



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS DE PALMAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**RAMON OLIVEIRA DOS SANTOS**

**USO DE ESCAMAS DE PEIXE COMO ADSORVENTE  
NATURAL PARA GLIFOSATO**

Palmas/TO  
2025

**RAMON OLIVEIRA DOS SANTOS**

**USO DE ESCAMAS DE PEIXE COMO ADSORVENTE  
NATURAL PARA GLIFOSATO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal do Tocantins, Câmpus  
Universitário de Palmas, como requisito parcial para a  
obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Adriano Guarda.

Palmas/TO  
2025

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

S237u Santos, Ramon Oliveira dos.

Uso de Escamas de Peixe Como Adsorvente Natural Para Glifosato. /  
Ramon Oliveira dos Santos. – Palmas, TO, 2025.

42 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus  
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Ambiental, 2025.

Orientador: Emerson Adriano Guarda

1. Adsorventes Naturais. 2. Escama de Peixe. 3. Glifosato. 4. DCCR. I.  
Titulo

**CDD 628**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

# **FOLHA DE APROVAÇÃO**

RAMON OLIVEIRA DOS SANTOS

## **USO DE ESCAMAS DE PEIXE COMO ADSORVENTE NATURAL PARA GLIFOSATO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal do Tocantins, Câmpus  
Universitário de Palmas, como requisito parcial para a  
obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Data de aprovação: 21/11/2025

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Emerson Adriano Guarda, UFT

---

Prof(a). Dr(a). Patricia Martins Guarda, UFT

---

Prof. Me. Álvaro Alves Martins, UFT

Palmas, 2025

Não se pode escrever nada  
com indiferença.  
(Simone de Beauvoir)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me dado força e fé para não desanimar, mesmo nos momentos mais desafiadores. Pela providência que sempre chegou no tempo certo e por me guiar em cada passo dessa jornada.

Aos meus pais, Erisvaldo Pereira dos Santos e Zilma Oliveira dos Santos, por nunca deixarem de acreditar em mim e por estarem presentes em todas as minhas escolhas e decisões. À minha irmã, Karoline Oliveira dos Santos, que sempre foi uma motivação, mesmo sem perceber, e me inspira a ser um bom exemplo de pessoa.

Ao meu amor, Suzana Monteiro, por ser minha base e motivação diária, por acreditar em mim desde o começo e enxergar o meu potencial mesmo quando eu duvidei. Sua presença foi essencial em cada conquista.

Aos meus amigos e amigas que estiveram comigo nessa caminhada — Guilherme Catani, Joelson Souza, Maria Clara, Lucas Feitosa, Ev, Sofia, Bruno Catani, Murilo Prado e Artur Espindola — pela amizade, pelas risadas e por tornarem esse percurso mais leve e inesquecível.

A todos os professores com quem tive o privilégio de aprender ao longo dessa trajetória, pelo conhecimento compartilhado e pelo exemplo de dedicação e compromisso com o ensino.

Ao meu orientador, Emerson Guarda, pela paciência, pela confiança e por nunca me deixar desacreditar que seria possível concluir este trabalho. Sua orientação foi fundamental para que eu chegasse até aqui.

Aos membros da banca examinadora, Patrícia Guarda e Álvaro, pela disponibilidade em compor a banca e pelas contribuições valiosas, que enriqueceram ainda mais este trabalho.

E, por fim, a todos os membros do LAPEQ, em especial Fabrício, Yuri, Wanderson e Annaydy, pela ajuda, pelas conversas e pelo suporte constante durante os momentos em laboratório. A convivência e o aprendizado que tive com vocês fizeram toda a diferença.

## RESUMO

O crescente uso de agrotóxicos na agricultura moderna tem gerado um impacto ambiental significativo, com destaque para a contaminação de recursos hídricos pelo Glifosato, o herbicida mais aplicado globalmente. A busca por soluções de baixo custo e ecologicamente sustentáveis para a remediação ambiental é, portanto, urgente. Este trabalho avaliou a viabilidade técnica da escama de peixe, um resíduo da indústria pesqueira, como precursor de um adsorvente para a remoção de Glifosato em meio aquoso. O material foi testado nas formas in natura e calcinada, e o processo de adsorção foi otimizado através do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), variando-se a Massa do Adsorvente e o Tempo de Contato. O adsorvente calcinado demonstrou-se superior, devido à reorganização de sua matriz de hidroxiapatita, que atua como modelo estrutural, promovendo o aumento da área superficial e da porosidade. O modelo de regressão obtido para o material calcinado apresentou ausência de falta de ajuste ( $p=0,9868$ ), confirmando a coerência interna dos dados. Os resultados experimentais indicaram a alta eficácia do adsorvente calcinado, que atingiu a eficiência máxima de mais de 98,32% em quatro ensaios, resultando em concentrações residuais de Glifosato abaixo do Limite de Quantificação (LQ), determinado por Cromatografia Iônica. A variável massa do Adsorvente foi identificada como o fator de maior influência, com a máxima remoção alcançada nas menores massas testadas. O mecanismo predominante é a atração eletrostática, favorecida pela condição de pH da solução inferior ao Ponto de Carga Zero do material. Conclui-se que o adsorvente de escama de peixe calcinada é uma alternativa tecnicamente viável, ambientalmente sustentável e de alto potencial competitivo para o tratamento de águas contaminadas.

**Palavras-chaves:** Glifosato. Escamas de Peixe. Adsorção. DCCR. Adsorventes Naturais.

## ABSTRACT

The growing use of agrochemicals in modern agriculture has generated a significant environmental impact, highlighted by the contamination of water resources by Glyphosate, the most widely applied herbicide globally. The search for low-cost and environmentally sustainable solutions for environmental remediation is therefore urgent. This study evaluated the technical feasibility of fish scales, a residue from the fishing industry, as a precursor for an adsorbent used in the removal of Glyphosate from aqueous solutions. The material was tested in its in natura and calcined (activated carbon) forms, and the adsorption process was optimized through the Rotational Central Composite Design (RCCD), by varying the Adsorbent Mass and Contact Time. The calcined adsorbent demonstrated superiority due to the reorganization of its hydroxyapatite matrix, which acts as a structural template, promoting an increase in surface area and porosity. The regression model obtained for the calcined material showed no lack of fit ( $p=0.9868$ ), confirming the internal consistency of the data. Experimental results indicated the high effectiveness of the calcined adsorbent, which achieved a maximum efficiency of over 98.32% in four tests, resulting in residual Glyphosate concentrations below the Limit of Quantification (LQ) of the Ion Chromatograph. The Adsorbent Mass variable was identified as the factor of greatest influence, with maximum removal achieved at the lowest masses tested. The predominant mechanism is electrostatic attraction, favored by the solution's pH condition being lower than the material's Point of Zero Charge. It is concluded that the calcined fish scale adsorbent is a technically viable, environmentally sustainable, and highly competitive potential alternative for treating contaminated water.

**Keywords:** Glyphosate; Fish Scales; Adsorption; RCCD; Natural Adsorbents.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fórmula estrutural do glifosato.....	15
Figura 2 - Representação do processo de adsorção por fisissorção e quimissorção.....	17
Figura 3 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos .....	20
Figura 4 - Incubadora agitadora TE-4200 da Tecnal.....	24
Figura 5 - Cromatógrafo Iônico Metrohm 930 Compact IC Flex e Amostrador Automático 919 IC Autosampler plus.....	24
Figura 6 - Gráfico comparativo das eficiências de remoção: In Natura × Calcinada.....	27
Figura 7 - Gráfico de Pareto dos efeitos normalizados – In Natura .....	28
Figura 8 - Gráfico de valores experimentais versus preditos – In Natura .....	28
Figura 9 - Gráfico de Pareto dos efeitos normalizados – Calcinada .....	29
Figura 10 - Gráfico de valores experimentais versus preditos – Calcinada .....	29
Figura 11 - Superfície de Resposta - Calcinada .....	30

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Planejamento experimental com Variáveis Reais e Codificadas .....	22
Tabela 2 - Planejamento experimental com variáveis reais das amostras In Natura e Calcinada .....	25

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
2.1	Objetivo Geral	13
2.2	Objetivos Específicos	13
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>14</b>
3.1	Agrotóxicos: o glifosato e seus impactos	14
3.2	Legislação	15
3.3	O processo de adsorção como método de remoção do glifosato	16
3.4	Escamas de peixe como adsorventes naturais	18
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>20</b>
4.1	Obtenção e preparo das escamas de peixe	21
4.2	Soluções de glifosato	21
4.3	Delineamento experimental	21
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>25</b>
5.1	Vantagem estrutural do adsorvente calcinado	25
5.2	Mecanismo eletrostático e influência do pH na adsorção	32
5.3	Otimização do processo por Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)	25
5.3.1	Matriz experimental e análise preliminar dos resultados brutos	25
5.3.2	Modelagem matemática e validação estatística	27
5.3.3	Análise dos termos e superfície de resposta	30
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento contínuo da monocultura em larga escala, impulsionada pelo aumento populacional e pela crescente demanda por alimentos, tem tornado o agronegócio uma das principais atividades econômicas globais. No entanto, essa otimização da produtividade está intrinsecamente ligada à aplicação massiva de substâncias químicas, como os agrotóxicos (SEVERINO; RODRIGUES; LIMA, 2018). O Brasil é um protagonista nesse cenário, sendo considerado o maior consumidor mundial de agrotóxicos desde 2008 (SOARES et al., 2024). Entre os compostos mais utilizados globalmente, o glifosato destaca-se, com mais de 150 marcas comerciais, sendo amplamente empregado nos maiores cultivos nacionais, como milho, soja e cana-de-açúcar (ADEGAS et al., 2022; MEROTTO JR et al., 2022; IBAMA, 2020).

A crescente e, muitas vezes, indiscriminada utilização dessas substâncias químicas gera graves impactos ambientais e de saúde pública. Grande parte desses produtos é altamente tóxica e, após a aplicação, sua alta resistência à degradação permite que resíduos persistam, sendo dispersos através de lixiviação e escoamento superficial (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Essa dispersão resulta na contaminação generalizada de águas superficiais e subterrâneas, comprometendo a qualidade e a segurança dos recursos hídricos. A contaminação é tão alarmante que, em algumas regiões brasileiras, misturas de até 27 tipos diferentes de pesticidas já foram detectadas na água destinada ao consumo humano (RIBEIRO, 2019).

Os impactos se estendem diretamente à saúde. A exposição humana ao glifosato e outros agrotóxicos, seja por ingestão de água contaminada ou alimentos, pode causar sérios danos, mesmo em doses baixas. Os efeitos variam desde intoxicações agudas e problemas respiratórios até distúrbios hormonais e o aumento do risco de desenvolvimento de câncer a longo prazo (INCA, 2021). No meio ambiente, estudos mostram que o glifosato é tóxico para uma variedade de organismos, incluindo anfíbios, peixes e répteis, afetando a biodiversidade e a estabilidade dos ecossistemas aquáticos (EVALEN et al., 2024).

Diante da persistência dos resíduos nas culturas, no solo e na água, a remoção eficaz desses agrotóxicos torna-se uma prioridade crucial para garantir a segurança ecológica e a sustentabilidade dos recursos hídricos.

A problemática da contaminação se agrava pelo fato de que os tratamentos aplicados nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) convencionais (primários e secundários) não são suficientemente eficazes. Tais métodos falham, em especial, na mitigação de contaminantes orgânicos persistentes que se apresentam em concentrações traço ( $\text{mg.L}^{-1}$  e  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ),

demandando a busca por alternativas de tratamento viáveis (YOCOYAMA, 2023; RIBEIRO, 2019).

Neste contexto, a adsorção emerge como um método robusto e complementar. Trata-se de um fenômeno de superfície que envolve a acumulação controlada de contaminantes (adsorvato) na superfície de um material sólido (adsorvente), sendo uma técnica essencial no tratamento de efluentes (VASIĆ *et al.*, 2023). Embora adsorventes de alta performance, como o carvão ativado, sejam amplamente utilizados devido à sua elevada área superficial e porosidade, seus custos de produção são significativamente altos, inviabilizando sua aplicação econômica em larga escala (VASIĆ *et al.*, 2023). Essa restrição impulsiona a pesquisa por materiais alternativos que sejam eficientes, de baixo custo e ecologicamente sustentáveis.

Diferentes tipos de adsorventes podem ser empregados no tratamento de águas, abrangendo desde materiais sintéticos, como zeólitas, sílica gel e alumina, até adsorventes de origem natural e de baixo custo.

Entre as alternativas promissoras e de baixo custo, materiais lignocelulósicos e resíduos biológicos, como as escamas de peixe, têm ganhado destaque pelo seu potencial como biossorventes (VASIĆ *et al.*, 2023; SHAIKHIEV *et al.*, 2020). A capacidade adsortiva destes materiais pode ser substancialmente aprimorada através de modificações como o tratamento térmico ou a calcinação, que alteram suas propriedades estruturais e químicas (OSMAN *et al.*, 2023; AKINDOLIE; CHOI, 2023).

As escamas são naturalmente ricas em colágeno e hidroxiapatita, com sítios funcionais já capazes de interagir com poluentes (SOW *et al.*, 2023). No entanto, o diferencial central deste estudo reside na otimização desse material via tratamento térmico. A capacidade adsortiva pode ser substancialmente aprimorada através da calcinação, um processo rigorosamente controlado que altera a estrutura do material. A calcinação induz transformações na morfologia e nas ligações químicas, convertendo a matriz em uma estrutura altamente porosa e carbonácea, o que favorece a formação de novos sítios ativos e aumenta a acessibilidade aos contaminantes (TANG, 2024; OSMAN *et al.*, 2023).

Dessa forma, o presente trabalho investiga a produção de adsorventes sustentáveis a partir de escamas de peixe para a remoção de agrotóxicos em soluções aquosas e busca comparar o desempenho adsortivo das escamas de peixe in natura e das escamas calcinadas frente à mitigação de agrotóxicos, verificando o impacto do tratamento térmico a partir de análise da sua eficiência quantitativa de remoção e investigação dos valores ótimos de massa do adsorvente (g/l) e tempo de contato (min), para sua melhor aplicabilidade.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Investigar a eficiência de adsorventes naturais obtidos de escamas de peixe, nas formas in natura e calcinada, na remoção do glifosato de soluções aquosas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Preparar os adsorventes a partir da escama de peixe nas formas in natura e calcinada;
2. Analisar a influência das variáveis de tempo de contato e massa do adsorvente antes e após o contato;
3. Determinar o percentual de remoção do glifosato pelo processo de adsorção após delineamento experimental;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Agrotóxicos: o glifosato e seus impactos

O Glifosato [N-(fosfonometil)glicina] é um herbicida de amplo espectro pertencente ao grupo químico dos aminoácidos fosfonados (GALLI et al., 2024). Sua descoberta em 1950, por Henri Martin, visava um potencial uso farmacêutico. No entanto, sua capacidade de inibir o crescimento das plantas levou à sua reorientação para o controle de ervas daninhas, tornando-se o ingrediente ativo de mais de 750 herbicidas (GUYTON *et al.*, 2015).

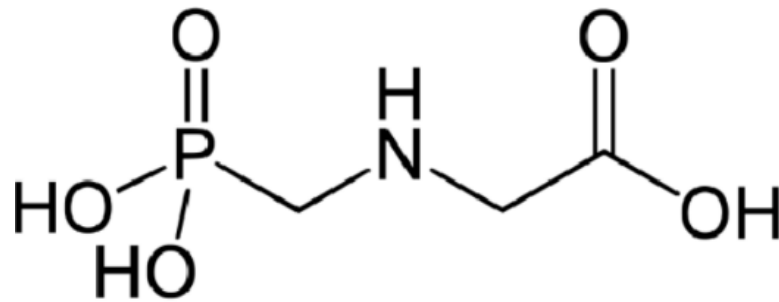
Globalmente, a aplicação de herbicidas à base de Glifosato aumentou cerca de 100 vezes desde o final da década de 70, impulsionada significativamente pela introdução de culturas geneticamente modificadas (GM) tolerantes ao composto, as chamadas "Roundup Ready" (BENBROOK, 2016; MYERS *et al.*, 2016). Nessas culturas (como a soja, onde seu uso é amplamente destacado) (CANAL RURAL, 2016), o Glifosato pode ser aplicado diretamente sobre a planta de interesse para eliminar as ervas daninhas recorrentes que competem com a cultura. Além da esfera agrícola, o Glifosato é amplamente aplicado em zonas urbanas para o controle de vegetação indesejável em acostamentos de estradas, passeios públicos e ambientes residenciais (ISLAM et al., 2021; PORTIER, 2020).

No Brasil, o cenário é de consumo massivo. O país é o maior consumidor mundial desde 2008, e o Glifosato, representando aproximadamente 40% em volume de todos os defensivos agrícolas usados, domina grandes culturas, sendo o defensivo mais vendido (CARNEIRO et al., 2015; IBAMA, 2016; IEA, 2016; IBAMA, 2020; WEISS, 2025).

Uma vez aplicado, o Glifosato, devido à sua alta solubilidade e persistência em campo, pode contaminar diferentes compartimentos ambientais, incluindo solo, águas superficiais e subterrâneas, como lençóis freáticos e rios (BARROS; ALBUQUERQUE JUNIOR, 2025). Sua dispersão em corpos d'água ocorre por diversos mecanismos, como a deriva durante a pulverização, o escoamento superficial e a drenagem (KLÁTYIK et al., 2024). Adicionalmente, o Glifosato é empregado também no controle de plantas daninhas aquáticas, o que culmina na contaminação direta dos recursos hídricos.

A contaminação hídrica por Glifosato e seu principal produto de degradação, o ácido aminometilfosfônico (AMPA), é um problema crítico de saúde pública e ambiental. O composto apresenta alta resistência à degradação biológica e química, persistindo nas águas e bioacumulando-se (TRESNAKOVA; STARA; VELISEK, 2021). A fórmula estrutural do glifosato é apresentada na figura subsequente.

Figura 1 - Fórmula estrutural do glifosato



Fonte: Autoral (2025).

O uso excessivo deste herbicida acarreta em efeitos tóxicos no meio ambiente e na saúde humana por meio de exposição crônica e aguda (AGOSTINI et al., 2020). A exposição humana e animal ao Glifosato, mesmo em concentrações traço, está associada a sérios danos à saúde, incluindo distúrbios neurológicos e o aumento do risco de câncer, conforme classificação da IARC (2015) (STACHIW, 2019; INCA, 2021). Estudos adicionais evidenciam a toxicidade do composto para organismos aquáticos, como anfíbios e peixes, afetando sua reprodução e sobrevivência (FLACH et al., 2024; KLÁTYIK et al., 2024).

### 3.2 Legislação

A exposição a produtos tóxicos na água para consumo humano representa um grave problema de saúde pública, exigindo controle rigoroso da contaminação dos recursos hídricos. A regulamentação brasileira evoluiu a partir da Portaria GM/MS nº 36, de 19 de janeiro de 1990, que estabeleceu a obrigatoriedade do monitoramento de agrotóxicos na água e definiu os padrões de potabilidade, estipulando Valores Máximos Permissíveis (VMP) para características físicas, organolépticas e químicas (BRASIL, 1990).

Este arcabouço normativo foi complementado pela Portaria MS nº 1.469, de 29 de dezembro de 2000, cujo Art. 12 detalhou as características e VMPs de substâncias químicas na água, abrangendo inorgânicas, orgânicas, praguicidas, desinfetantes e produtos secundários da desinfecção (BRASIL, 2000). As portarias subsequentes, como a Portaria MS nº 518, de 25 de março de 2004, e a então vigente Portaria MS nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011, mantiveram e revisaram os padrões, controlando um total de 27 agrotóxicos na água, conforme seu Anexo VII (BRASIL, 2011).

Atualmente, o padrão de potabilidade é regido pela Portaria Gabinete do Ministro/Ministério da Saúde (GM/MS) nº 888, de 4 de maio de 2021 (que revogou a anterior

Portaria 2.914/2011). Esta normativa especifica que a água potável no Brasil pode conter um limite máximo de 500 µg/L de glifosato (BRASIL, 2021).

Apesar do esforço regulatório, o VMP estabelecido para o Glifosato no Brasil é notavelmente mais permissivo quando comparado à legislação de outras jurisdições. Na União Europeia, por exemplo, estabelece como “concentração máxima admissível” para qualquer agrotóxico em água potável, como substâncias individuais, o limite de 0,1 µg/L, desde que a concentração total de agrotóxicos não ultrapasse 0,5 µg/L (CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 1998).

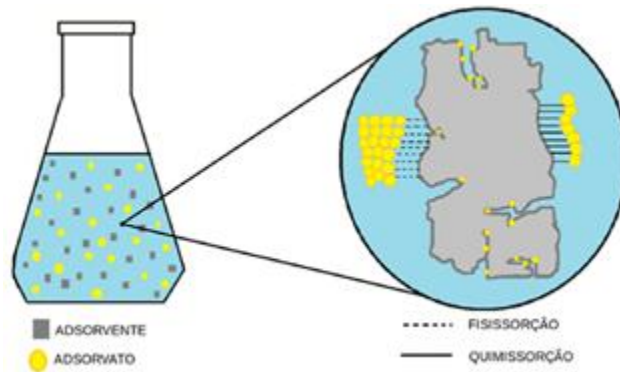
Adicionalmente, o cenário regulatório brasileiro tem sinalizado uma flexibilização no controle de pesticidas. A legislação estendeu a autorização para vendas do Glifosato e desclassificou seu nível de toxicidade (ARAÚJO *et al.*, 2023). Um indicativo dessa tendência é o número de registros de novos agrotóxicos: somente em 2020, foi aprovado o registro de 493 novos produtos, o maior número documentado pelo Ministério da Agricultura desde o ano 2000 (BBC NEWS BRASIL, 2021).

### **3.3 O processo de adsorção como método de remoção do glifosato**

Diversos métodos têm sido explorados na literatura científica para a remoção de contaminantes como o glifosato em água. Entre os principais, destacam-se a mineralização fotocatalítica e os Processos Oxidativos Avançados (POAs), que são valorizados por sua capacidade de degradar contaminantes orgânicos persistentes (BAMIDURO *et al.*, 2023; SILVA *et al.*, 2022). Outros estudos incluem técnicas de separação por membrana, como a ultrafiltração, que se sobressai pela eficácia na retenção de matéria orgânica, microrganismos e agrotóxicos (CHEN *et al.*, 2019; SANTOYO *et al.*, 2020; COLEHO; REIS, 2021; AZIZ *et al.*, 2024).

No entanto, a adsorção é amplamente reconhecida como uma das técnicas mais eficazes e, frequentemente, economicamente mais viáveis para a remoção de contaminantes em fase líquida (MELO; NAVAL, 2023; QIU *et al.*, 2024). O processo de adsorção baseia-se na retenção do adsorvato (o Glifosato) na superfície de um adsorvente sólido. A adsorção ocorre por meio de interações que podem ser de natureza física (fisissorção), impulsionada por Forças de Van der Waals, ou química (quimissorção), envolvendo troca de elétrons e ligações fortes (OLIVEIRA *et al.*, 2023; RODRIGUES *et al.*, 2023). A eficácia do processo é influenciada pelas características do adsorvente, que são materiais capazes de reter um soluto em sua superfície (FROTA *et al.*, 2023; ALKHALDIA *et al.*, 2024). Ilustrando, tem-se a figura a seguir

Figura 2 - Representação do processo de adsorção por fisissorção e quimissorção



Fonte: Paschoal (2021).

A classificação dos sólidos adsorventes é determinada, em grande parte, pelo tamanho de seus poros, que influenciam a capacidade de adsorção ao facilitar a entrada das espécies adsorvidas (íons ou moléculas), e por sua polaridade (hidrofílicos ou hidrofóbicos), que define a afinidade com o adsorvato (SHI; SANTISO; GUBBINS, 2021). Dentre os materiais tradicionalmente utilizados como adsorventes no tratamento de água, destacavam-se a sílica, a alumina, as argilas, as zeólitas e o carvão ativado, amplamente empregados até o final do século XX. Entretanto, pesquisas recentes indicam que, embora esses materiais ainda sejam aplicados, vêm sendo gradualmente substituídos por alternativas mais eficientes e sustentáveis (SATYAM; PATRA, 2024; GOMES et al., 2025; KHAN et al., 2025).

As limitações dos adsorventes convencionais, como alto custo e baixa seletividade, impulsionaram o desenvolvimento de nanotubos de carbono, grafeno, estruturas metalorgânicas e biopolímeros, que ampliam a capacidade e a reutilização dos sistemas. Além disso, as argilas permanecem relevantes, mas são modificadas por funcionalização e formação de compósitos híbridos, o que aumenta sua eficiência e reduz custos. As técnicas atuais de adsorção física e química aplicadas a sistemas de purificação e biogás incorporam esses novos materiais, marcando uma transição tecnológica no campo da adsorção ambiental (SATYAM; PATRA, 2024; GOMES et al., 2025; KHAN et al., 2025).

O carvão ativado é um material que se sobressai devido à sua elevada porosidade, ampla área superficial e afinidade química, conferindo-lhe eficiência na captura de uma grande quantidade de contaminantes líquidos e gasosos, incluindo agrotóxicos (FISCHERI et al., 2019; FALLAH et al., 2022; ZIELIŃSKI; MIĄDLICKI; PRZEPIÓRSKI, 2022). Esta capacidade é conferida pelas suas características químicas e morfológicas (LEE et al., 2021), onde lâminas carbônicas empilhadas de forma irregular formam uma rede tridimensional, criando uma

microporosidade complexa (estrutura turboestática) que fornece as condições necessárias para a adsorção (ALBERTI, 2022).

### 3.4 Escamas de peixe como adsorventes naturais

O aproveitamento de resíduos industriais como matéria-prima para a obtenção de adsorventes alinha-se diretamente à perspectiva ambiental de valorização de subprodutos e à busca por soluções economicamente viáveis para o tratamento de efluentes (RIBEIRO, 2019). As escamas de peixe configuram um resíduo abundante, mas sua composição e estrutura não são idênticas entre espécies. Os peixes de água doce, como a tilápia (*Oreochromis niloticus* e *O. mossambicus*), diferem de espécies marinhas, como robalo riscado (*Morone saxatilis*), salmão (*Salmo salar*) e bacalhau (*Gadus morhua*), quanto às características químicas e físicas de seus tecidos (SANTOS, 2017).

Essa variação indica que o tipo de escama depende do ambiente de origem, sendo inadequado tratá-las como equivalentes em processos que envolvem propriedades adsorptivas (SANTOS, 2017), que pode ser processado para gerar adsorventes com propriedades específicas de retenção, abrindo possibilidades para aplicação em sistemas de purificação de águas contaminadas (NEVES *et al.*, 2018; SHOURIJE *et al.*, 2023; YILDIZ; YÜKSEL, 2024). As escamas são classificadas como um compósito natural (TAN *et al.*, 2024), apresentando uma estrutura mista (NÚÑEZ-TAPIA *et al.*, 2025) em peixes de água doce ou marítimos (SALINDEHO *et al.*, 2022). Sua constituição é rica em matriz orgânica, representada principalmente pelo colágeno, e matriz inorgânica, formada pela hidroxiapatita [ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ] composta por cálcio e fósforo (SANTOS, 2016).

Essa composição mista é fundamental para a conversão em adsorventes, uma vez que o colágeno fornece a fonte de carbono durante a carbonização, enquanto a hidroxiapatita, que pode atingir teores médios de 98,81% em espécies como a tilápia-do-Nilo (SANTOS, 2016), serve como modelo estrutural. A hidroxiapatita guia a formação de uma porosidade específica na estrutura, resultando em um carbono poroso de alta área superficial (SANTOS *et al.*, 2023) e conferindo estabilidade estrutural ao material (SIDDIQUI; PICKERING; MUCALO, 2018). A herança mineral das escamas é essencial; a análise de difração de raios X e a espectroscopia infravermelho revelam que os compostos de cálcio e fósforo persistem na matriz calcinosa, o que contribui para a estabilidade estrutural e influencia a configuração porosa final (ALBERTI, 2022). O controle das condições de preparação é crucial, pois a solubilidade do cálcio, por exemplo, é maior em pH ácido, um fator determinante na preparação e desempenho dos adsorventes derivados (SANTOS, 2016).

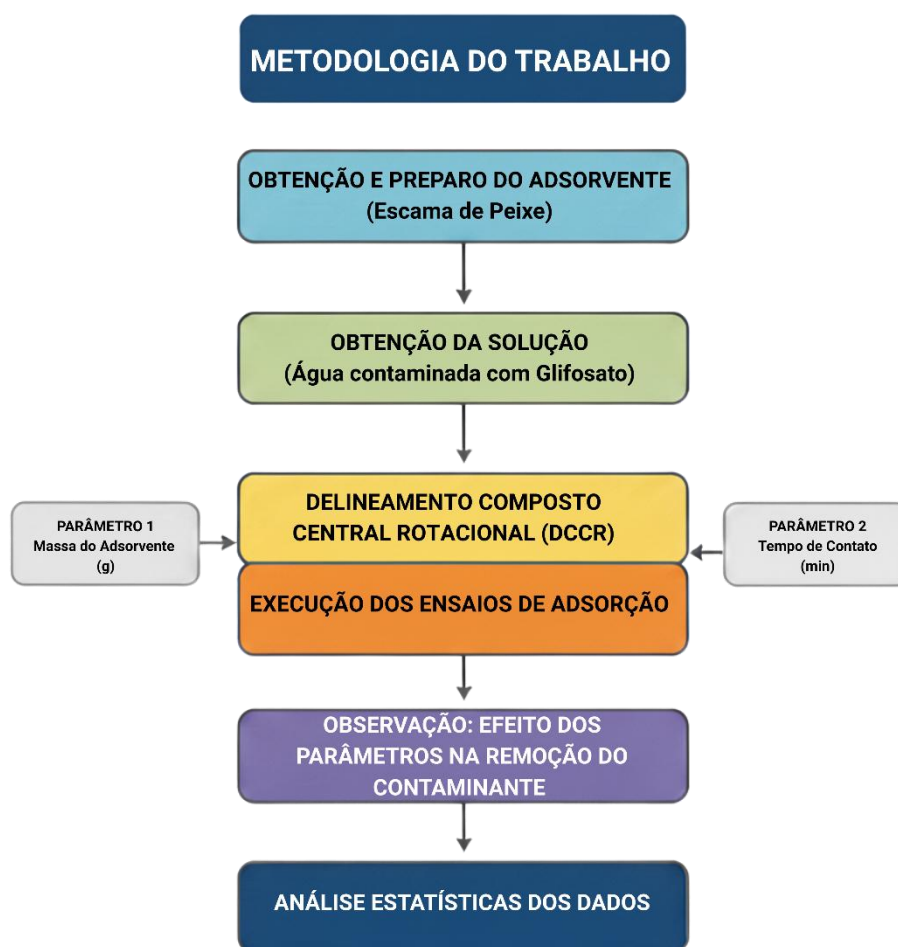
O potencial das escamas como adsorventes tem sido validado em diversas pesquisas. As escamas de tilápia na remoção do corante reativo azul 5G demonstram a relevância da caracterização detalhada (área superficial e porosidade) e da modificação da superfície para o aumento da eficiência (RETAMAR et al., 2022). A presença de eletrólitos (NaCl) e surfactantes alterou a cinética de adsorção (YILDIZ; YÜKSEL, 2024). Além disso, a variação da velocidade de agitação (entre 450 e 1400 rpm) se mostrou um fator decisivo na transferência de massa (NEVES, 2016; PRAMESTI; KUSUMADEWI; HADISOEBROTO, 2021). O controle do pH, por sua vez, alterou significativamente a interação entre o corante e a superfície, reforçando a necessidade de se definir condições ótimas para a aplicação em sistemas complexos (NEVES, 2016).

A aplicabilidade desses materiais também foi comprovada em cenários práticos. Ribeiro (2019) demonstrou, em escala industrial, que a integração do adsorvente em pó como etapa prévia à coagulação e floculação resulta em melhorias consistentes. O processo associado garantiu um aumento de 12% na remoção da carga orgânica em relação ao tratamento convencional, alcançando uma remoção média de Demanda Química de Oxigênio (DQO) de 77% e assegurando o cumprimento das normas legais para lançamento de efluentes (RIBEIRO, 2019). Tais resultados evidenciam que a adsorção, quando complementada por outros processos físico-químicos, oferece uma alternativa robusta e viável para a mitigação de contaminantes emergentes, justificando o estudo aprofundado de adsorventes naturais derivados de escamas de peixe.

#### 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada no presente trabalho compreendeu as seguintes etapas: a obtenção e o preparo do adsorvente (escamas de peixe), a obtenção da solução de água contaminada com glifosato (solução teste sintética), o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para otimização dos processos, a execução dos ensaios de adsorção, e a análise estatística dos dados obtidos nos testes. Durante os experimentos, foram observados os efeitos dos parâmetros massa do adsorvente (g) e tempo de contato (min) na remoção do contaminante. Como variável resposta foi usada o % de remoção do glifosato. Todos os procedimentos experimentais foram realizados na Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Universitário de Palmas, nas instalações do Laboratório de Pesquisa em Química Ambiental e Biocombustíveis (LAPEQ), ao longo do segundo semestre de 2025. As análises neste estudo foram realizadas conforme mostrado no fluxograma a seguir.

Figura 3 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos



Fonte: Autoral (2025)

#### 4.1 Obtenção e preparo das escamas de peixe

Utilizaram-se, neste estudo, escamas de peixe da espécie *Oreochromis niloticus* (Tilápia). Inicialmente, as amostras foram lavadas em água corrente, com o objetivo de remover secreções superficiais e em seguida, foram imersas em solução de HCl 1M por 24 horas à temperatura ambiente. Após esse período, as escamas foram lavadas com ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )  $0,5\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  e, subsequentemente, com água destilada, antes de serem espalhadas em bandejas e submetidas à secagem em estufa a  $60\text{ }^\circ\text{C}$  por 24 horas.

As escamas secas foram então divididas em duas amostras distintas: uma destinada ao uso in natura e outra destinada ao uso calcinado. A amostra in natura foi apenas moída, sem tratamento térmico. Já a amostra destinada à calcinação foi submetida a tratamento em mufla a  $550\text{ }^\circ\text{C}$  por 1 hora, com o objetivo de eliminar a matéria orgânica e favorecer a formação de uma matriz inorgânica com potencial presença de hidroxiapatita (HAp). Os valores de massa obtidos em cada preparação serviram de base para a definição dos limites de massa do adsorvente no planejamento experimental. (Mandal *et al.*, 2015).

#### 4.2 Soluções de glifosato

Para a realização dos experimentos, a solução de glifosato utilizada foi disponibilizada pelo Laboratório de Pesquisa em Química Ambiental e Biocombustíveis (LAPEQ) da Universidade Federal do Tocantins (UFT).

A concentração exata dessa solução, bem como as análises necessárias para a quantificação do glifosato (antes e após o tratamento), foram realizadas por meio da técnica de cromatografia iônica. Para tal, utilizou-se o cromatógrafo iônico (IC) compacto da marca Metrohm, modelo 930 Compact IC Flex, com detecção por condutividade. As separações cromatográficas foram conduzidas em coluna Metrosep A Supp 7 (250/4,0 mm), operando a  $45,0\text{ }^\circ\text{C}$ , com vazão de  $0,700\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  e tempo total de corrida de 40 min. Este equipamento de alta precisão foi fundamental para garantir a acurácia dos dados de remoção e otimização obtidos no estudo.

#### 4.3 Delineamento experimental

O planejamento experimental foi conduzido por meio do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), utilizando o software Protimiza Experimental Design, com o objetivo de otimizar as condições de máxima remoção do glifosato.

Este mesmo delineamento foi aplicado de forma idêntica para as duas amostras de adsorventes em estudo: a forma *in natura* e a forma calcinada.

O DCCR totalizou 11 ensaios, incluindo pontos centrais (PC), utilizados para estimar o erro puro e avaliar a reprodutibilidade do sistema, permitindo a avaliação da influência de dois parâmetros (variáveis independentes) sobre a porcentagem de remoção (variável de resposta): a massa de adsorvente (em gramas) e o tempo de contato (em minutos). As combinações de variáveis investigadas abrangeram os limites de massa do adsorvente de 0,29 g a 1,71 g, definidos a partir da quantidade total de material disponível para os ensaios, e tempos de contato entre 0 minutos e 142,78 minutos, conforme a tabela a seguir.

Tabela 1 - Planejamento experimental com Variáveis Reais e Codificadas

Ensaio	Variáveis Reais		Variáveis Codificadas	
	Massa (g)	Tempo (Min)	Massa (g)	Tempo (min)
1	0,50	10	-1	-1
2	1,50	10	-1	1
3	0,50	120	1	-1
4	1,50	120	1	1
5	0,29	65	-1,41	0
6	1,71	65	1,41	0
7	1	0,00	0	-1,41
8	1	142,78	0	1,41
9	1	65	0	0
10	1	65	0	0
11	1	65	0	0

Fonte: Autoral (2025).

Os ensaios de sorção foram realizados em 30 mL de solução aquosa de glifosato, em condições de batelada. Antes da adição dos adsorventes, o potencial hidrogeniônico (pH) das soluções foi aferido por meio de fita de papel indicador de pH. Observou-se que a solução padrão de glifosato apresentou pH em torno de 5,0. Após o contato com os adsorventes, o pH das soluções estabilizou-se em 6,0 tanto para o material *in natura* quanto para o material calcinado, indicando alteração do meio devido à interação solução–adsorvente. Em cada ensaio, a biomassa definida pelo planejamento foi adicionada às soluções e levadas a *agitadora TE-4200 da Tecnal*.

As soluções foram mantidas sob agitação pelo tempo determinado, assegurando o contato efetivo entre o adsorvente e o contaminante. O sistema de agitação utilizado é apresentado na figura 4.

Figura 4 - Incubadora agitadora TE-4200 da Tecnal



Posteriormente, para a separação da fase sólida (adsorvente) da fase líquida (solução), as amostras foram submetidas à filtração em papel filtro qualitativo. As alíquotas resultantes, contendo o glifosato residual, foram então encaminhadas para análise em um sistema de cromatografia iônica. O sistema analítico consistiu no cromatógrafo iônico (IC) compacto da marca Metrohm 930 Compact IC Flex (detector de condutividade), acoplado ao 919 IC Autosampler plus. As análises foram realizadas em coluna Metrosep A Supp 7 (250/4,0 mm), com vazão de  $0,700 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $45,0 \text{ }^\circ\text{C}$  e 40 min de corrida. Este sistema permitiu a quantificação da concentração remanescente do contaminante e o cálculo preciso do percentual de glifosato removido pelo adsorvente em cada ensaio.

Os equipamentos utilizados são apresentados respectivamente na figura 5.

Figura 5 - Cromatógrafo Iônico Metrohm 930 Compact IC Flex e Amostrador Automático 919 IC Autosampler plus



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Otimização do processo por Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

#### 5.1.1 Matriz experimental e análise preliminar dos resultados brutos

O Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) foi aplicado ao adsorvente derivado de escamas de peixe, tanto em sua forma in natura quanto calcinada. A Tabela 2 apresenta a matriz experimental completa, com as combinações das variáveis independentes — massa (g) e tempo de contato (min) — e as respostas obtidas em termos de eficiência de remoção de glifosato (%).

A concentração inicial de glifosato foi de  $0,357 \text{ mg.L}^{-1}$ , e o limite de quantificação (LQ) do cromatógrafo iônico utilizado foi de  $0,006 \text{ mg.L}^{-1}$ .

Nos casos em que o valor medido foi  $< \text{LQ}$ , considerou-se a eficiência de remoção como superior a 98,32%.

Tabela 2 - Planejamento experimental com variáveis reais das amostras In Natura e Calcinada

Ensaio	Massa (X1, g)	Tempo (X2, min)	Remoção In Natura (%)	Remoção Calcinada (%)
<b>1</b>	0,50	10,00	63,31	(<LQ)
<b>2</b>	1,50	10,00	<b>91,60</b>	83,75
<b>3</b>	0,50	120,00	83,19	(< LQ)
<b>4</b>	1,50	120,00	62,46	82,35
<b>5</b>	0,29	65,00	84,03	(< LQ)
<b>6</b>	1,71	65,00	64,43	81,79
<b>7</b>	1,00	0,00	56,02	(< LQ)
<b>8</b>	1,00	142,78	-12,61	86,27
<b>9 (PC)</b>	1,00	65,00	78,71	<b>90,48</b>
<b>10 (PC)</b>	1,00	65,00	78,71	59,10
<b>11 (PC)</b>	1,00	65,00	72,55	89,36

Fonte: Autoral (2025).

*Nota: O valor de -12,61% no Ensaio 8 é uma anomalia analítica (remoção negativa), sendo tratado como outlier e excluído da modelagem de regressão para a amostra In Natura.*

A análise preliminar dos resultados reforça de maneira evidente a superioridade do material calcinado em relação ao in natura no processo de remoção do glifosato. O adsorvente submetido à calcinação atingiu o limite de quantificação (LQ) do equipamento em quatro ensaios (1, 3, 5 e 7), o que corresponde a eficiências superiores a 98,32%, mesmo quando aplicadas as menores massas de adsorvente (0,29g e 0,50g). Esse comportamento indica que,

para o material tratado termicamente, a redução da massa não compromete a capacidade adsorptiva, evidenciando uma alta densidade de sítios ativos acessíveis e uma cinética de adsorção acelerada.

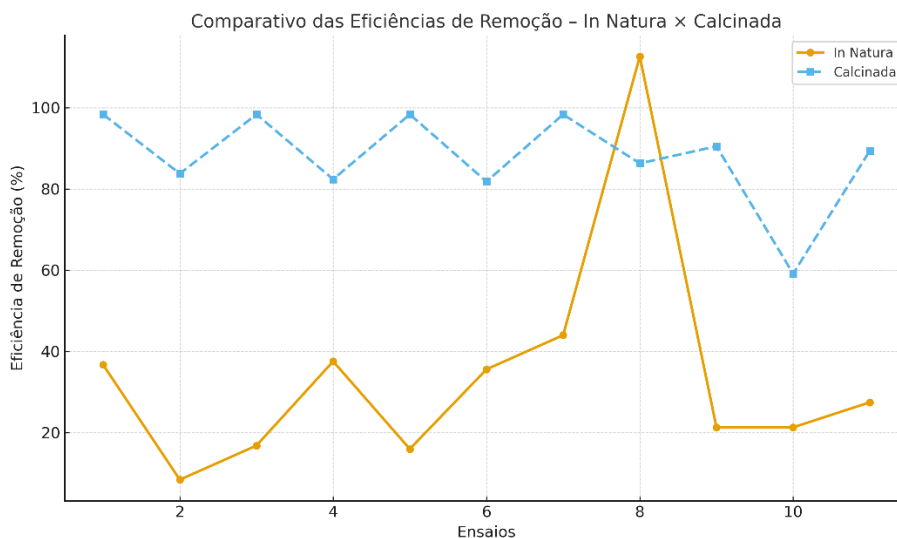
Nos ensaios intermediários e de ponto central, os resultados do adsorvente calcinado, apesar de apresentarem uma dispersão considerável nos Pontos Centrais (variando entre 59,10% e 90,48%), mantiveram um alto potencial de remoção. Tal dispersão, típica de experimentos ambientais, é justificada pela dificuldade de controle de fatores físicos como aglomeração e sedimentação das partículas, variações na intensidade de mistura, heterogeneidade granulométrica do adsorvente e oscilações de temperatura.

Em contrapartida, o material *in natura* apresentou comportamento mais irregular e disperso, com amplitudes de variação expressivas entre os ensaios. Além da anomalia do Ensaio 8, a repetição exata de 78,71% nos Pontos Centrais 9 e 10 aponta para uma baixa precisão da amostra *in natura*. Tal instabilidade está diretamente relacionada à heterogeneidade da superfície e à presença de resíduos orgânicos remanescentes, provenientes da matriz colagenosa das escamas.

A diferença observada entre os dois materiais é resultado direto das modificações morfológicas e químicas promovidas pela calcinação, processo que aumenta substancialmente a porosidade e a área superficial específica, além de expor e reorganizar grupos funcionais capazes de interagir com as espécies aniônicas do glifosato. Conforme destacado por Amorim et al. (2020), a hidroxiapatita presente nas escamas atua como um modelo estrutural (template) durante a ativação térmica, direcionando a formação de microcanais e cavidades regulares que ampliam a capacidade adsorptiva do material.

Essas observações iniciais, obtidas a partir da matriz experimental do DCCR, indicam que as variáveis massa e tempo de contato exercem influência distinta sobre cada tipo de material. No caso do adsorvente *in natura*, a remoção é fortemente dependente da dosagem e do tempo de equilíbrio, enquanto o material calcinado apresenta maior eficiência em um intervalo mais amplo de condições operacionais, demonstrando comportamento mais previsível e potencial para otimização estatística nas etapas subsequentes do estudo.

Figura 6 - Gráfico comparativo das eficiências de remoção: In Natura × Calcina



Fonte: Autoral (2025).

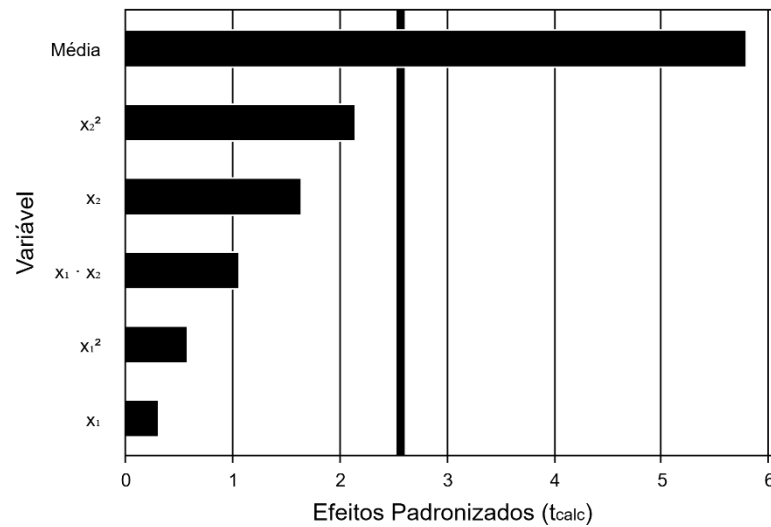
### 5.1.2 Modelagem matemática e validação estatística

A Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada para validar os modelos de regressão obtidos a partir dos resultados experimentais, verificando a significância estatística dos termos e a qualidade do ajuste, conforme a metodologia de Montgomery (2012) e Guimarães (2008).

O modelo de regressão ajustado para a amostra *in natura* não apresentou significância estatística global ( $p = 0,22782$ ), com coeficiente de determinação  $R^2 = 67,00\%$ . A ANOVA demonstrou falta de ajuste significativa ( $F_{\text{calc}} = 68,4$ ;  $p = 0,01444$ ), indicando que parte da variabilidade dos dados não foi explicada pelo modelo ajustado.

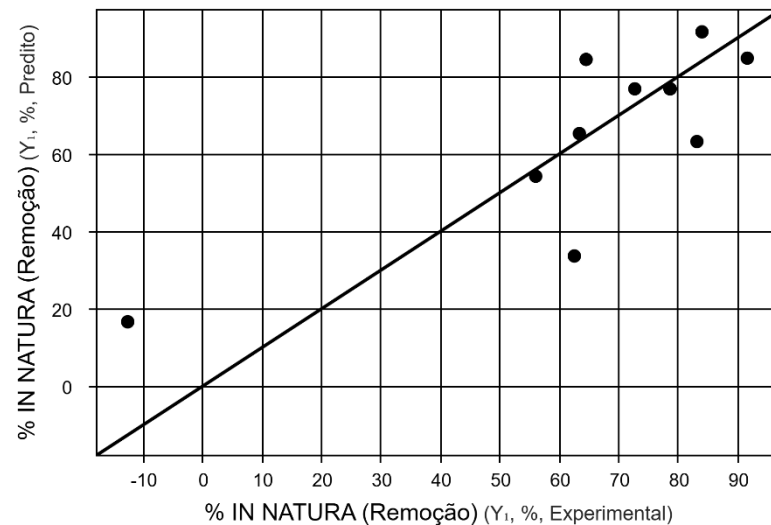
O Gráfico de Pareto evidencia que o termo quadrático do tempo ( $x_2^2$ ) possui maior influência sobre a resposta, superando o efeito da massa ( $x_1$ ). Esse comportamento sugere que o processo de adsorção *in natura* é limitado por fenômenos cinéticos de difusão intrapartícula, conforme também observado por Vieira *et al.* (2018) em estudos de adsorção com materiais de origem orgânica.

Figura 7 - Gráfico de Pareto dos efeitos normalizados – In Natura



Fonte: Autoral (2025)

Figura 8 - Gráfico de valores experimentais versus preditos – In Natura



Fonte: Autoral (2025).

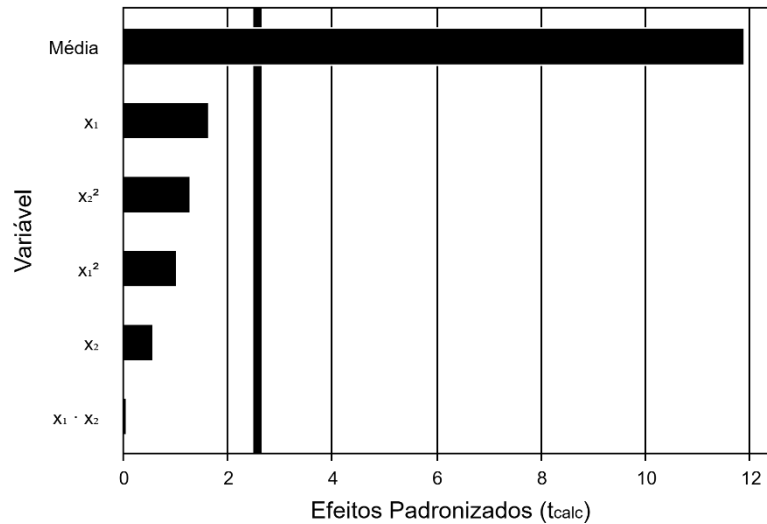
Para o adsorvente calcinado, o modelo de regressão apresentou  $p = 0,4888$  e  $R^2 = 50,65\%$ , não sendo estatisticamente significativo ao nível de 5%. Esta falha em alcançar significância implica que a Massa e o Tempo, no intervalo estudado, não foram os fatores principais na variação da eficiência. Portanto, o modelo não é adequado para fins de otimização quantitativa. Entretanto, o teste de falta de ajuste não foi significativo ( $p = 0,9868$ ), o que confirma a coerência interna do modelo e sua validade para interpretação qualitativa das tendências e dos efeitos dos fatores estudados (MONTGOMERY, 2012).

A equação ajustada de segunda ordem é expressa por:

$$Y_{\text{Calcinação}} = 79,65 - 6,74x_1 + 5,08x_1^2 - 2,31x_2 + 6,20x_2^2 - 0,35x_1x_2$$

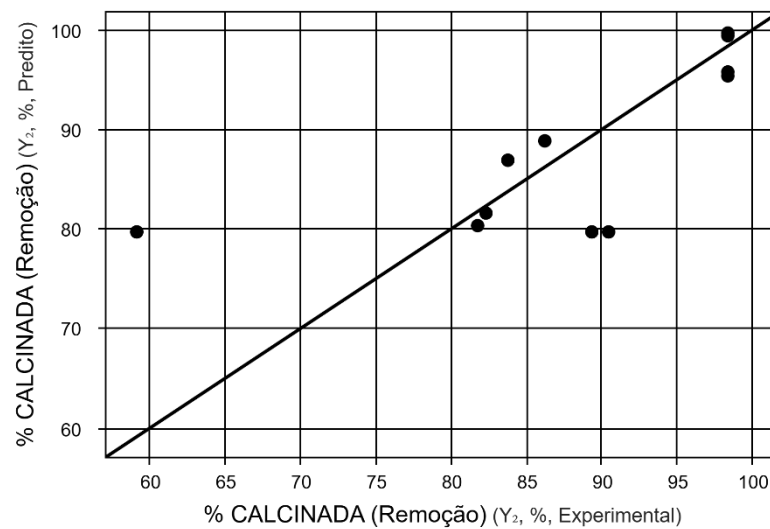
O modelo apresenta comportamento estável, refletindo a uniformidade dos resultados experimentais e a menor dispersão observada para o material calcinado.

Figura 9 - Gráfico de Pareto dos efeitos normalizados – Calcinação



Fonte: Autoral (2025)

Figura 10 - Gráfico de valores experimentais versus preditos – Calcinação



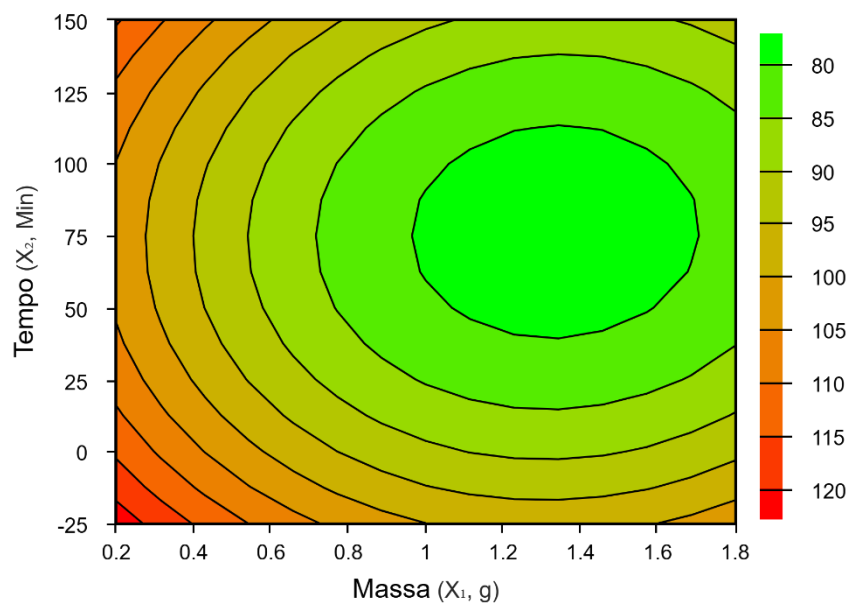
Fonte: Autoral (2025).

### 5.1.3 Análise dos termos e superfície de resposta

A análise dos coeficientes e do Gráficos de Pareto (Figuras 9 e 10) apontam que os termos de maior efeito são o da massa ( $x_1$ ) e o quadrático de tempo ( $x_2^2$ ). A influência negativa do termo linear da massa ( $x_1$ ) e a positiva do termo quadrático ( $x_1^2$ ) sugerem que a máxima eficiência está associada a uma massa intermediária.

A Superfície de Resposta (Figura 11) ilustra que a região de alta eficiência (> 98,32 %) é alcançada em tempos médios ( $\approx 60$ – $100$  min). A distribuição das isolinhas é compatível com a contribuição do termo quadrático de tempo ( $x_2^2$ ) e com a baixa interação entre as variáveis, enquanto a predominância da massa sobre o tempo indica que o principal fator de controle do processo é a disponibilidade de sítios ativos na superfície do material (HUANG et al., 2014; ALBERTI, 2022). Estudos mostram, adicionalmente, que o aumento da dosagem do adsorvente tende a ampliar a área superficial disponível e, por consequência, a quantidade de soluto adsorvido (MONTGOMERY, 2012; VIEIRA et al., 2018).

Figura 11 - Superfície de Resposta - Calcinada



Fonte: Autoral (2025).

A predominância da massa sobre o tempo indica que o principal fator de controle do processo é a disponibilidade de sítios ativos de adsorção, uma vez que a dosagem do adsorvente aumenta o número de sítios acessíveis — embora associações entre partículas possam reduzir pontos efetivos de adsorção em certas condições (ÇIÇEKÇI et al., 2025).

Esse efeito está alinhado ao princípio de que a intensidade de adsorção está diretamente relacionada à área superficial específica do material poroso (WANG et al., 2025). No caso das escamas calcinadas, a hidroxiapatita atua como modelo estrutural (template) durante a carbonização/ativação, direcionando a formação de poros e resultando em elevada área superficial (SATYAM; PATRA, 2024), o que favorece a captura do soluto.

Além disso, a literatura descreve que a difusão intrapartícula tende a ser a etapa limitante em muitos sistemas, condicionando a resposta à morfologia/porosidade do material e às condições operacionais (WEI et al., 2023).

## 5.2 Mecanismo eletrostático e influência do pH na adsorção

A adsorção de glifosato está fortemente ligada às características de carga da superfície do adsorvente e da molécula do contaminante, sendo o pH um fator de controle primordial. Para o carvão derivado de escamas de peixe, o Ponto de Carga Zero (pH<sub>pcz</sub>), que define a carga superficial do material, situa-se tipicamente em valores ligeiramente alcalinos, em torno de 7,5.

O pH da solução de glifosato, inicialmente em 5,0, migrou para um valor de equilíbrio de 6,0 após o contato com os adsorventes. Este pH (6,0) é significativamente inferior ao pH<sub>pcz</sub> de 7,5. Essa condição favorece a atração eletrostática, pois a superfície do adsorvente calcinado assume uma carga residual predominantemente positiva, enquanto o glifosato encontra-se majoritariamente na forma aniônica (negativa). Adicionalmente, atuam mecanismos de quimissorção, como a formação de pontes de hidrogênio entre os grupos funcionais (EBRAHIMZADEH; AKBARI, 2025).

A alta eficiência do adsorvente calcinado contrasta com a dispersão de resultados observada nos Pontos Centrais (variando entre 59,10% e 90,48%). Essa variabilidade é tipicamente associada à dificuldade de controle de fatores físicos em batelada, como a aglomeração das partículas e a temperatura, e será devidamente investigada pela análise estatística (DCCR).

## 5.3 Efeito da calcinação na estrutura do adsorvente

A análise comparativa da capacidade de remoção entre o adsorvente de escamas de peixe in natura e a sua forma calcinada é fundamental para compreender a otimização do material. O processo de calcinação foi empregado justamente para potencializar as propriedades adsorptivas das escamas, um composto natural cuja composição é essencialmente formada pela matriz orgânica, principalmente colágeno, e pela matriz inorgânica, rica em hidroxiapatita  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  (SANTOS, 2016).

A superioridade da amostra calcinada na remoção de glifosato é uma consequência direta da modificação estrutural induzida pela temperatura. Durante o tratamento térmico, ocorre a decomposição e a eliminação da matriz orgânica de colágeno. Conforme a literatura, esta remoção de material orgânico facilita a formação de uma estrutura porosa mais desenvolvida, onde a hidroxiapatita atua como um modelo estrutural (template) que confere estabilidade e direciona a porosidade do material final (FERUZZI, 2017; RENDA et al., 2023). Essa estruturação resulta em um aumento significativo da área superficial, proporcionando maior número de sítios ativos acessíveis para a interação com o contaminante.

Dessa forma, o adsorvente in natura, limitado por sua estrutura fibrosa e menos porosa, apresenta desempenho inferior em comparação ao material calcinado. A conversão térmica é o passo crucial que transforma o resíduo em um material com características de adsorvente, justificando a escolha e aplicação primária do adsorvente calcinado nas etapas de otimização por DCCR e na busca pela máxima eficiência de remoção do glifosato.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a viabilidade técnica da escama de peixe, um resíduo abundante e de baixo custo, como precursor de um adsorvente para a remoção de glifosato em meio aquoso, utilizando a otimização por Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). Os resultados alcançados demonstram o potencial do material calcinado e respondem aos objetivos propostos:

- **Preparação dos Adsorventes:** O tratamento térmico foi bem-sucedido, conferindo ao adsorvente calcinado uma superioridade evidente. A análise comparativa indicou que a matriz de hidroxiapatita reorganizada pelo processo de calcinação melhora a estrutura porosa e a densidade de sítios ativos em comparação com o material in natura.
- **Percentual de Remoção e Eficiência:** O adsorvente calcinado demonstrou alta eficácia, alcançando a eficiência máxima de mais de 98,32% em três ensaios, o que significa que a concentração residual de glifosato ficou abaixo do Limite de Quantificação (LQ) do cromatógrafo. Este desempenho é superior ao de outros adsorventes, reforçando a competitividade do material.
- **Influência das Variáveis:** A análise exploratória do DCCR demonstrou que a massa do adsorvente (fator X1) foi o fator de maior influência no processo. A eficiência máxima foi alcançada com as menores massas testadas (0,29 gramas e 0,5 gramas), confirmando que a alta densidade de sítios ativos do material calcinado é o principal fator limitante. A alta remoção em tempos reduzidos confirmou, ainda, que a cinética de adsorção é rápida, impulsionada pela forte atração eletrostática Glifosato/Adsorvente (pois o pH da solução era inferior ao pH do ponto de carga zero do material).
- **Aplicação do Modelo e Precisão:** Os modelos de regressão obtidos para o adsorvente calcinado apresentaram ausência de falta de ajuste ( $p = 0,9868$ ), o que garante a coerência interna dos dados experimentais. A análise qualitativa do modelo ajustado foi utilizada com sucesso para mapear as tendências e identificar as regiões de melhor desempenho.

Conclui-se que o adsorvente de escama de peixe calcinado é uma alternativa tecnicamente viável, ecologicamente sustentável e de alto potencial competitivo para a remoção de glifosato em águas, contribuindo significativamente para o avanço de métodos de tratamento que utilizam resíduos como matéria-prima.

## 7 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O sucesso na remoção de glifosato utilizando o carvão de escama de peixe calcinada abre diversas oportunidades para a continuidade da pesquisa e o aprofundamento da compreensão do processo.

As propostas de pesquisa incluem:

- a necessidade de realizar a caracterização textural detalhada do adsorvente (CAPC), determinando a área superficial específica e a distribuição do tamanho de poros por métodos como o BET. Tal análise é crucial para correlacionar a estrutura de poros do adsorvente com as dimensões moleculares do glifosato, investigando, assim, possíveis efeitos de peneira molecular e a acessibilidade dos sítios ativos internos.
- Aprofundar os estudos de cinética e equilíbrio de adsorção, aplicando modelos cinéticos (pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem) e determinando as isotermas de adsorção (Langmuir, Freundlich e BET) para calcular a capacidade máxima de adsorção do material.
- Avaliar a influência de outros parâmetros operacionais no processo adsorptivo, como a temperatura (para a determinação dos parâmetros termodinâmicos) e a velocidade de agitação (para avaliar a resistência à transferência de massa externa), e a granulometria do adsorvente.

Por fim, visando a aplicação prática, é fundamental investigar o processo de adsorção em colunas de leito fixo, simulando a operação em modo contínuo, e avaliar a capacidade de adsorção do CAPC em amostras de água natural e efluentes reais (sistemas multicomponentes), verificando a interferência de matrizes complexas no desempenho final.

## 8 REFERÊNCIAS

ADEGAS, Fernando S. et al. Glyphosate-resistant (GR) soybean and corn in Brazil: past, present, and future. **Advances in Weed Science**, v. 40, n.1, p. 1-12, 2022.

AGOSTINI, Lidiane P. et al. Effects of glyphosate exposure on human health: Insights from epidemiological and in vitro studies. **Science of the Total Environment**, v. 705, p. 135808, 2020.

AKINDOLIE, M. S.; CHOI, H. J. Acid modification of lignocellulosic derived material for dye and heavy metals removal: a review. **Environmental Engineering Research**, v. 28, n. 2, p. 1-17, 2023.

ALBERTI, Schaline Winck. **Adsorção de ciprofloxacina por carvão ativado produzido a partir de escama de peixe**. 2022. 93f. Dissertação( Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, 2022.

ALKHALDI, Huda et al. Sustainable polymeric adsorbents for adsorption-based water remediation and pathogen deactivation: a review. **RSC Advances**, v. 14, n. 45, p. 33143-33190, 2024.

AMORIM, Mateus Oliveira de et al. Síntese e caracterização de hidroxiapatita natural extraída de escamas de pirarucu (*Arapaima gigas*). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, p. 1-9, 2020.

ARAUJO, Leandro Goulart de et al. Glyphosate uses, adverse effects and alternatives: focus on the current scenario in Brazil. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 45, n. 12, p. 9559-9582, 2023.

AZIZ, Shahid et al. A comprehensive review of membrane-based water filtration techniques. **Applied Water Science**, v. 14, n. 8, p. 1-17, 2024.

BAMIDURO, Gbemisola J. et al. Rapid photocatalytic mineralization of glyphosate by Pd@BiVO<sub>4</sub>/BiOBr nanosheets: mechanistic studies and degradation pathways. **Catalysis Communications**, v. 174, p. 1-9, 2023.

BARROS, Marcos Antonio Sousa; ALBUQUERQUE JUNIOR, Eden Cavalcante de. Avaliação espacial da contaminação ambiental por agrotóxicos no município de Petrolina - PE. **Aracê**, v. 7, n. 7, p. 38165-38226, 2025.

BBC NEWS BRASIL. O impacto do glifosato no meio ambiente e na saúde humana. **BBC**, 23 de maio de 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-57209799>. Acesso em: 07 nov. 2025.

BENBROOK, Charles. **Tendências no uso do herbicida glifosato nos Estados Unidos e globalmente**. Nova York: Environmental Sciences Europe, 2016.

BRASIL. **Portaria Federal no 1.469/2000, de 29 de dezembro de 2000**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água

para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Secretaria de Vigilância em Saúde/MS, Brasília, 29 de dezembro de 2000. Disponível em: [https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2000/prt1469\\_29\\_12\\_2000.html](https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2000/prt1469_29_12_2000.html). Acesso em: 07 nov. 2025.

BRASIL. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Ministério da Saúde, Brasília, 04 de maio de 2021. Disponível em: [https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888\\_07\\_05\\_2021.html](https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html). Acesso em: 07 nov. 2025.

BRASIL. **Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Ministério da Saúde, Brasília, 12 de dezembro de 2011. Disponível em: [https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html). Acesso em: 07 nov. 2025.

BRASIL. **Portaria nº 36, de 19 de janeiro de 1990**. Aprova normas e padrões de potabilidade de água destinado ao consumo humano. Ministério da Saúde, Brasília, 23 de janeiro de 1990. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=100991>. Acesso em: 07 nov. 2025.

CANAL RURAL. Safra 2016/2017 – Diversificação de culturas. **Canal Rural**, 22 de agosto de 2016. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/agricultura/safra-20162017-diversificacao-de-culturas/>. Acesso em: 07 nov. 2025.

CARNEIRO, Fernando Ferreira et al. **Dossiê Abrasco - um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde**. Rio de Janeiro/São Paulo: Abrasco, 2015.

CHEN, Dawei et al. A simple liquid chromatography-high resolution mass spectrometry method for the determination of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in human urine using cold-induced phase separation and hydrophilic pipette tip solid-phase extraction. **Journal of Chromatography A**, v. 1587, p. 73-78, 2019.

ÇIÇEKÇİ, Ali et al. Adsorption capacity, reaction kinetics and thermodynamic studies on Ni (II) removal with GO@ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ Pluronic-F68 nanocomposite. **Polymers**, v. 17, n. 15, p. 1-22, 2025.

COELHO, Edumar Ramos Cabral; REIS, Dariene Patricia. Ultrafiltração na remoção de glifosato e ácido aminometilfosfônico em águas de abastecimento. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 5, p. 837-843, 2021.

CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. **Directiva 98/83/CE do Conselho, de 3 de Novembro de 1998**. Relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:01998L0083-20151027>. Acesso em: 07 nov. 2025.

EBRAHIMZADEH, Fatemeh; AKBARI, Ali. Investigation the adsorption mechanisms,

chemical resistance and mechanical strength of the synthesized chitosan/activated carbon composite in methylene blue removal. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 1-15, 2025.

EVALEN, P. S et al. Toxicity of glyphosate to animals: a meta-analytical approach. **Environmental Pollution**, v. 347, p. 1-7, 2024.

FALLAH, Zari et al. Toxicity and remediation of pharmaceuticals and pesticides using metal oxides and carbon nanomaterials. **Chemosphere**, v. 275, p. 1-79, 2021.

FERRUZZI, A. C. S. **Obtenção de apatita a partir das escamas do peixe tilápia do nilo (*Oreochromis niloticus*) empregando o processo de calcinação**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2017.

FISCHER, Helen Caroline Valter et al. Estudo da capacidade de adsorção de carvões ativados comerciais versus tempo de armazenamento. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1090-1099, 2019.

FLACH, Hannah et al. Glyphosate formulations cause mortality and diverse sublethal defects during embryonic development of the amphibian *Xenopus laevis*. **Chemosphere**, v. 367, p. 1-14, 2024.

FROTA, André MA et al. Understanding the properties of activated carbon and biochar for the adsorption and removal of cyanotoxins: a systematic review. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 95, n. 2, p. 1-21, 2023.

GALLI, Flavia Silvia et al. Overview of human health effects related to glyphosate exposure. **Frontiers in Toxicology**, v. 6, p. 1-14, 2024.

GOMES, Carla et al. Da amostragem à purificação: metodologias e técnicas para avaliação de siloxanos no biogás. **Química Nova**, v. 48, n. 4, p. 1-11, 2025.

GUIMARÃES, Paulo Ricardo Bittencourt. **Métodos quantitativos estatísticos**. 1. ed. Curitiba: IESDE Brasil S.A., 2008.

GUYTON, Kathryn Z. et al. Carcinogenicity of tetrachlorvinphos, parathion, malathion, diazinon, and glyphosate. **The Lancet Oncology**, v. 16, n. 5, p. 490-491, 2015.

HUANG, Zhe et al. High-performance fish-scale-based porous carbon for the removal of methylene blue from aqueous solution. **Rsc Advances**, v. 4, n. 36, p. 18737-18743, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER (INCA). **Glifosato e câncer: riscos e prevenções**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Saúde, 2021.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). Glyphosate Monograph. IARC, 2015. Disponível em: <https://www.iarc.who.int/news-events/glyphosate-monograph-now-available/>. Acesso em: 07 nov. 2025.

ISLAM, Meftaul et al. Glyphosate use in urban landscape soils: Fate, distribution, and potential human and environmental health risks. **Journal of Environmental Management**, v.

292, p. 112786, 2021.

KHAN, Shahab et al. Clay-based materials for enhanced water treatment: adsorption mechanisms, challenges, and future directions. **Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences**, v. 11, n. 2, p. 219-234, 2025.

KLÁTYIK, Szandra et al. Aquatic ecotoxicity of glyphosate, its formulations, and co-formulants: evidence from 2010 to 2023. **Environmental Sciences Europe**, v. 36, n. 1, p. 1-62, 2024.

LEE, Sanghoon et al. Quantifying surface morphology of manufactured activated carbon and the waste coffee grounds using the Getis-Ord-Gi\* statistic and Ripley's K function. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1-9, 2021.

MELO, Rayssa Lima de; NAVAL, Liliana Pena. Low-cost sorbent for removing glyphosate from aqueous solutions for non-potable reuse. **Revista Ambiente & Água**, v. 18, p. 1-15, 2023.

MEROTTO JR, Aldo et al. Herbicide use history and perspective in South America. **Advances in Weed Science**, v. 40, n. 1, p. 1-18, 2022.

MONDAL, B.; MONDAL, S.; MONDAL, A.; MANDAL, N. **Fish scale derived hydroxyapatite scaffold for bone tissue engineering**. *Materials Characterization*, v. 121, p. 112–124, 2016. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.09.034.

MONTGOMERY, Douglas. **Design and analysis of experiments**. New York: Springer, 2012.

MYERS, John Peterson et al. Concerns over use of glyphosate-based herbicides and risks associated with exposures: a consensus statement. **Environmental Health**, v. 15, n. 1, p. -13, 2016.

NASCIMENTO, R. F. et al. **Adsorção - aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 2. ed. Fortaleza, CE: Imprensa Universitária UFC, 2020.

NEVES, C. V. et al. Phenomenological modeling of reactive dye adsorption onto fish scales surface in the presence of electrolyte and surfactant mixtures. **Environmental Technology**, v. 39, n. 19, p. 2467-2483, 2018.

NEVES, Camila Vargas. **Avaliação da influência do eletrólito NaCl e surfactante Profiber na adsorção do corante reativo azul 5G pelas escamas de peixe**. 2016. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, PR, 2016.

NÚÑEZ-TAPIA, Israel et al. Bio-based composite membranes from fish scales: A novel approach to harnessing collagen and hydroxyapatite for tissue engineering applications. **Biomedical Engineering Advances**, v. 9, p. 1-12, 2025.

OLIVEIRA, Giovana Rocha de et al. Chitosan biopolymer in glyphosate adsorption: use in environmental monitoring or remediation. **Holos**, v. 5, n. 39, p. 1-13, 2023.

OLIVEIRA, M. C.; FERREIRA, T. R.; COSTA, D. A. Adsorção de glifosato em carvão ativado pulverizado: análise de eficiência e otimização de parâmetros. **Journal of Environmental Studies**, v. 12, 2021.

OLIVEIRA, M. F. et al. **Impacto do herbicida glifosato em propriedades químicas e biológicas de solos cultivados com soja transgênica RR**. Viçosa: Planta Daninha, 2016.

OSMAN, Ahmed et al. Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 4, p. 2337-2398, 2023.

PASCHOAL, Sirlei Marques. **Estudo da purificação de biodiesel utilizando membranas poliméricas e farelo de semente de maracujá como biossorvente**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Apucarana, 2021. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26800/1/membranasbiodieselmaraçuja.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2026.

PORTIER, Christopher J. A comprehensive analysis of the animal carcinogenicity data for glyphosate from chronic exposure rodent carcinogenicity studies. **Environmental Health**, v. 19, n. 1, p. 1-18, 2020.

PRAMESTI, K. A.; KUSUMADEWI, R. A.; HADISOEBROTO, R. The effect of mixing speed and contact time on the process of dye adsorption using corncobs adsorbent. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, p. 1-7, 2021.

QIU, Fuguo et al. Adsorption of glyphosate in water using iron-based water treatment residuals derived from drinking water treatment plants. **Processes**, v. 12, n. 7, p. 1-13, 2024.

RENDA, Carmen Greice et al. A “Zero-Cost” adsorbing hydroxyapatite-based material from amazon fishery waste for water remediation and nutrient release for agriculture. **Physchem**, v. 3, n. 1, p. 34-60, 2023.

RETAMAR, Bruna Winckler et al. Adsorption of methylene blue using fish scales as biosorbent. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 23, n. 3, p. 29-39, 2022.

RIBEIRO, Daniele. **Remoção de carga orgânica por coagulação/floculação e adsorção com carvão ativado em efluente industrial de empresa metalmeccânica produtora de ar condicionados**. 2019. 125f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RODRIGUES, Patricia Viana et al. Adsorption of glyphosate by palygorskite. **Materials Research**, v. 26, p. 1-13, 2023.

SALINDEHO, Netty et al. Fish scale rich in functional compounds and peptides: A potential nutraceutical to overcome undernutrition. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, p. 1-6, 2022.

SANTOS, Anastasio Moreno et al. Hydroxyapatite growth on activated carbon surface for methylene blue adsorption: effect of oxidation time and CaSiO<sub>3</sub> addition on hydrothermal incubation. **Applied Sciences**, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2023.

SANTOS, Leonardo Bidóia dos. **Escama de tilápia-do-Nilo: composição mineral, quantificação da hidroxiapatita de cálcio e caracterização de carbonato de cálcio do precipitado bruto** Toledo. 2016. 50f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2016.

SANTOYO, Gustavo et al. ACC deaminase in plant growth-promoting bacteria (PGPB): An efficient mechanism to counter salt stress in crops. **Microbiological Research**, v. 235, p. 1-10, 2020.

SATYAM, Satyam; PATRA, Sanjukta. Innovations and challenges in adsorption-based wastewater remediation: a comprehensive review. **Heliyon**, v. 10, n. 9, p. 1-24, 2024.

SEVERINO, Felipe Nunes; RODRIGUES, Jairo Sousa; LIMA, Pedro Henrique. **Remoção de glifosato de meio aquoso utilizando biossorbente preparado à partir de sabugo de milho**. 2018. 37f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, 2018.

SHAIKHIEV, Ildar et al. Fish scales as a biosorbent of pollutants from wastewaters. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 10, n. 6, p. 6893-6905, 2020.

SHI, Kaihang; SANTISO, Erik E.; GUBBINS, Keith E. Current advances in characterization of nano-porous materials: Pore size distribution and surface area. **Porous Materials: Theory and Its Application for Environmental Remediation**, p. 315-340, 2021.

SHOURIJE, Seyed Mohamad Javad Sajjadi et al. Using fish scales as a new biosorbent for adsorption of nickel and copper ions from wastewater and investigating the effects of electric and magnetic fields on the adsorption process. **Chemosphere**, v. 317, p. 1-31, 2023.

SIDDIQUI, Humair A.; PICKERING, Kim L.; MUCALO, Michael R. A review on the use of hydroxyapatite-carbonaceous structure composites in bone replacement materials for strengthening purposes. **Materials**, v. 11, n. 10, p. 1-32, 2018.

SILVA, Kellen Lagares Ferreira et al. Análises fisiológicas de genipa americana l.(rubiaceae), quando exposta a diferentes concentrações de glifosato. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 26, n. 3, p. 338-343, 2022.

SILVA, Naiana Pommerening da. **Utilização de diferentes materiais como adsorventes na remoção de nitrogênio amoniacal**. 2015.148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2015.

SOARES, Mariana Rosa et al. Environmental and occupational exposure to pesticides according to sociodemographic factors that affect cancer patients in Mato Grosso, Brazil. **Saúde em Debate**, v. 48, n. 141, p. 1-12, 2024.

SOW, Malcolm Miao Geng et al. Upcycling fish scales through heating for steganography and Rhodamine B adsorption application. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2023.

STACHIW, Rosani Teresinha da Silva. Percepção de trabalhadores rurais quanto aos efeitos toxicológicos do uso e exposição a agrotóxicos. **Nature and Conservation**, v. 12, n. 2, p. 11-18, 2019.

TAN, Yiming et al. Elasmoid fish scales as a natural fibre composite: microscopic heterogeneities in structure, mineral distribution, and mechanical properties. **Interface Focus**, v. 14, n. 3, p. 1-16, 2024.

TANG, Kuok Ho Daniel. Valorization of organic waste as biosorbents for wastewater treatment. **Water Emerging Contaminants & Nanoplastics**, v. 3, n. 4, 2024.

TRESNAKOVA, Nikola; STARA, Alzbeta; VELISEK, Josef. Effects of glyphosate and its metabolite AMPA on aquatic organisms. **Applied Sciences**, v. 11, n. 19, p. 1-15, 2021.

VASIĆ, Vesna et al. Lignocellulose-based biosorbents for the removal of contaminants of emerging concern (CECs) from water: a review. **Water**, v. 15, n. 10, p. 1-18, 2023.

VIEIRA, Gabriela Bonfanti et al. CeO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> nanostructures enhance adsorption and photocatalytic degradation of organic compounds in aqueous suspension. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 353, p. 325-336, 2018.

WANG, Yiquan et al. Preparation of biomass activated carbon and its adsorption performance for anionic/cationic dyes (10mg/L): A case study of coffee grounds, hemp stalks and macadamia nut shells. **Next Materials**, v. 9, p. 1-10, 2025.

WEI, Fang et al. Revealing the combined effect of active sites and intra-particle diffusion on adsorption mechanism of methylene blue on activated red-pulp pomelo peel biochar. **Molecules**, v. 28, n. 11, p. 1-21, 2023.

WEISS, Gabriella. Volume de defensivos aplicados cresce 4,5% no primeiro semestre. **Globo Rural**, 01 set. 2025. Disponível em: <https://globorural.globo.com/agricultura/noticia/2025/09/volume-de-defensivos-aplicados-cresce-45percent-no-primeiro-semester.ghtml>. Acesso em: 05 dez. 2025.

YAMAGUCHI, Natalia Ueda et al. Activated carbon loaded with manganese and iron for glyphosate adsorption: Kinetics, isotherms and thermodynamic studies. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 6, p. 1-15, 2019.

YILDIZ, Hakan; YÜKSEL, Arslan Yusuf. A novel biosorbent material from waste fish scales (*Cyprinus carpio*) for biosorption of toxic dyes in aquatic environments. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 15, n. 1, p. 1535-1548, 2024.

YOCOYAMA, Leonardo Yuji. **Impactos na saúde humana e ambiental do uso do glifosato como herbicida**: uma revisão sobre as técnicas de remediação. 2023. 52f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Biotecnologia) - Universidade Federal de São Paulo, São José dos Campos, 2023.

ZIELIŃSKI, Bartosz; MIĄDLICKI, Piotr; PRZEPIÓRSKI, Jacek. Development of activated carbon for removal of pesticides from water: case study. **Scientific reports**, v. 12, n. 1, p. 1-14, 2022.