

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

VICTOR DUARTE TRINDADE

**ADIÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO MATERIAL ADSORVENTE
EM SISTEMA DE FILTRAGEM DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO PARA
REMOÇÃO DE POLUENTES EMERGENTES**

**Alegrete
2025**

VICTOR DUARTE TRINDADE

**ADIÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO MATERIAL ADSORVENTE
EM SISTEMA DE FILTRAGEM DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO PARA
REMOÇÃO DE POLUENTES EMERGENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a Dra^a. Chiara Valsecchi.

**Alegrete
2025**

VICTOR DUARTE TRINDADE

ADIÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ COMO MATERIAL ADSORVENTE EM SISTEMA DE FILTRAGEM DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO PARA REMOÇÃO DE POLUENTES EMERGENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de julho de 2025.

Banca examinadora:

Profa. Dra. CHIARA VALSECCHI - UNIPAMPA - Orientador

Profa. Dra. MARILIA FERREIRA TAMIOSSO - UNIPAMPA

Profa. Dra. ADRIANA GINDRI SALBEGO - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CHIARA VALSECCHI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2025, às 09:32, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ADRIANA GINDRI SALBEGO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2025, às 10:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARILIA FERREIRA TAMIOSSO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/07/2025, às 16:57, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1778060** e o código CRC **4759D54F**.

AGRADECIMENTOS

A espiritualidade, que sempre esteve presente na minha vida, sempre me reergueu e me deu força para prosseguir, mesmo quando eu achei que não conseguiria. A Deus, em suas diversas formas e interpretações, mas no seu significado mais puro, dentro de cada um de nós.

À minha incrível MÃE, Daniela Duarte Trindade, por toda inspiração que foste para mim. O maior exemplo de mulher guerreira, batalhadora e forte, a maternidade em seu significado mais puro e amoroso. Ao meu PAI, Cláudio Trindade de Trindade, pela pessoa de caráter que sempre foste e pelo amor que me deste – do seu próprio jeito. A pessoa que me tornei hoje é fruto da base incrível que ambos me deram, mesmo com suas barreiras internas e com as dificuldades que a vida os fez encarar. Tenho orgulho da nossa trajetória. O diploma que venho a conquistar, antes de ser meu sonho, era o de vocês. Obrigado.

A mim mesmo, pela incrível trajetória que tive neste grande ciclo, o mais desafiador que já passei, em que enfrentei todos os meus traumas, medos e barreiras emocionais. A mim mesmo, por ter conseguido entender que cada um tem seu próprio tempo e seu jeito de lidar com cada situação. Por aprender a não me julgar por não conseguir ser perfeito e atender expectativas. Não mudaria nada nesta trajetória. Toda força vem da dor. Ao Victor de anos atrás: você conseguiu.

Às pessoas incríveis que cruzaram meu caminho nesse intervalo de tempo. Os laços de amizade, para mim, são os mais lindos e os que mais prezo. Agradeço imensamente aos meus primeiros companheiros de jornada, Carlos Eduardo Keller Bertolo e Luíza Dotta Scarrone, por todo apoio e ajuda durante as dificuldades que enfrentei. Agradeço muito à presença das minhas amigas na minha nova jornada: Isabeli Cristofari dos Santos, Luísa Sabedra Inda, Mariana Aguilhar Alves Antunes e Mônica Dalenogare Guimarães. Obrigado pelo apoio e por terem sido o motivo da leveza nos dias desgastantes da faculdade. E aos meus companheiros de vida, que eu levo no coração sempre: Gabriel Peccin, Isabella Duarte, Nicolas Freitas, Mariana Dias e Rayene Anacleto. O mérito nunca será exclusivamente meu.

Agradeço em especial à minha orientadora, Dra. Chiara Valsecchi, pela mentora incrível e capacitada que foste nesses anos de pesquisa. Também à Dra. Marília Ferreira Tamiosso, pelo apoio no desenvolvimento do trabalho, e à Dra. Adriana Salbego Gindri, pela disponibilidade e participação nesta etapa.

Agradeço à UNIPAMPA pela incrível jornada. Sou grato.

RESUMO

A intensificação da poluição dos recursos hídricos, impulsionada em grande parte pelo descarte inadequado de resíduos oriundos da atividade agroindustrial, tem comprometido de maneira significativa a qualidade da água destinada ao abastecimento público. Dentre os compostos emergentes de preocupação ambiental, destaca-se o 2 nitrofenol, um micropolvente com reconhecido potencial tóxico, muitas vezes não removido por processos convencionais de tratamento de água. Este estudo avaliou a eficácia da cinza da casca de arroz (CCA), subproduto abundante na região do Rio Grande do Sul, como material adsorvente de biomassa para remoção do 2-nitrofenol em águas destilada e bruta provenientes do Rio Ibirapuitã. Foram desenvolvidos dois modelos de sistemas de filtração inspirados nos processos convencionais empregados em estações de tratamento de água (ETAs): um modelo de referência, com utilização exclusiva de carvão antracito, e outro em que este material foi parcialmente substituído pela CCA. Para ambos os sistemas, foram realizados ensaios com monitoramento de parâmetros físico-químicos (pH, turbidez e condutividade elétrica), bem como da concentração do micropolvente, determinada por espectrofotometria UV-Vis. Os resultados indicaram que a CCA promoveu uma redução significativa da concentração de 2-nitrofenol, especialmente nos primeiros minutos de filtração, evidenciando sua capacidade adsorvente. Contudo, após períodos prolongados de operação, observou-se uma diminuição da sua eficiência adsorvente, possivelmente em decorrência da colmatação do leito filtrante. Em síntese, a CCA demonstrou potencial como alternativa viável e sustentável para aprimorar a eficiência do tratamento de águas contaminadas por micropoluentes emergentes, contribuindo para o desenvolvimento de soluções ambientalmente adequadas e economicamente viáveis na região estudada.

Palavras-chaves: Contaminantes emergentes; Saneamento básico; Processo de adsorção; CCA.

ABSTRACT

The intensification of water resource pollution, largely driven by the inadequate disposal of waste originating from agro-industrial activities, has significantly compromised the quality of water intended for public supply. Among the emerging compounds of environmental concern, 2-nitrophenol stands out as a micropollutant with a well-known toxic potential, often not removed by conventional water treatment processes. This study evaluated the effectiveness of rice husk ash (RHA), an abundant by-product in the state of Rio Grande do Sul, as a biomass-based adsorbent material for the removal of 2-nitrophenol in both distilled water and raw water collected from the Ibirapuitã River. Two filtration system models were developed, inspired by conventional processes employed in water treatment plants: a reference model using exclusively anthracite coal and another in which this material was partially replaced by RHA. For both systems, experiments were carried out with monitoring of physicochemical parameters (pH, turbidity, and electrical conductivity), as well as the concentration of the micropollutant, determined by UV-Vis spectrophotometry. The results indicated that RHA promoted a significant reduction in the concentration of 2-nitrophenol, especially during the initial minutes of filtration, demonstrating its adsorptive capacity. However, after prolonged operation periods, a decrease in its adsorptive efficiency was observed, possibly due to clogging of the filter bed. In summary, RHA demonstrated potential as a viable and sustainable alternative to enhance the efficiency of treatment processes for waters contaminated by emerging micropollutants, contributing to the development of environmentally appropriate and economically feasible solutions in the region under study.

Keywords: Emerging contaminants; Basic sanitation; Absorption process; RHA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de água tratada por região	17
Figura 2 - Processos do tratamento da água em uma ETA	18
Figura 3 - Esquemática do processo de filtração.....	21
Figura 4 - Distribuição da poluição hídrica no Brasil	23
Figura 5 - Produção anual de grãos por país	24
Figura 6 - Exportação anual de grãos por país.	24
Figura 7 - Países com maior uso de agrotóxicos no mundo	25
Figura 8 - Esquemática da fisissorção e da quimissorção.....	30
Figura 9 - (a) Esquemática do protótipo (b) Esquemática do protótipo c/ CCA	37
Figura 10 - Organização do programa experimental	37
Figura 11 - Série de peneiras utilizadas	39
Figura 12 - Sequência das peneiras.....	39
Figura 13 - 2-nitrofenol	41
Figura 14 - Coleta de água bruta.....	42
Figura 15 - Localização da retirada de água bruta	43
Figura 16 - Medição de parâmetros com Multiparâmetro	43
Figura 17 - Materiais utilizados na montagem dos sistemas	44
Figura 18 - Construção dos protótipos	45
Figura 19 - Disposição da granulometria nos protótipos: (a) 1 e (b) 2.....	47
Figura 20 - Disposição da granulometria nos protótipos, com água do rio, onde: (a) Protótipo 1 e (b) Protótipo 2	49
Figura 21 - Coleta de amostras	49
Figura 22 - Aparelho de espectrofotometria UV-VIS	50
Figura 23 - (a) Filtro inerte acoplado à seringa; (b) Cubetas de quartzo	51
Figura 24 - Granulometrias separadas.....	52
Figura 25 - Amostras dos materiais adsorventes	53
Figura 26 - MEV da CCA.....	53
Figura 27 - MEV do carvão	54
Figura 28 - Soluções concentradas.....	55
Figura 29 - Espectros de absorção do 2-nitrofenol.....	56
Figura 30 - Curva de calibração	56

Figura 31 - Espectro da água do rio.....	57
Figura 32 - (a) CCA envolvida em tecido não tecido; (b) Colchões de CCA - resultado	58
Figura 33 - Resultado da montagem dos protótipos 1 e 2.....	59
Figura 34 - (a) Porção representativa da solução de água destilada com 2-nitrofenol e (b) Água bruta com 2-nitrofenol.....	60
Figura 35 - Amostras de água destilada filtradas com carvão.....	61
Figura 36 - Amostras de água destilada filtradas com carvão e CCA	61
Figura 37 - Avaliação do desempenho: Carvão e Carvão + CCA	62
Figura 38 - Amostras de água bruta filtradas com carvão	64
Figura 39 - Amostras de água bruta filtradas com carvão + CCA	64
Figura 40 - Avaliação do desempenho: Água bruta no pico 209nm	65
Figura 41 - Avaliação do desempenho: Água bruta no pico 275nm	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de potabilidade da água.....	19
Tabela 2 - Controle de substâncias nocivas na água tratada.....	28
Tabela 3 - Exemplos de materiais adsorventes de biomassa	32
Tabela 4 - Classificação conforme a granulometria	38
Tabela 5 - Granulometria e altura das camadas: Protótipo 1	46
Tabela 6 - Granulometria e altura das camadas: Protótipo 2	46
Tabela 7 - Composição química da CCA e do carvão antracito, em % em massa ...	54
Tabela 8 - Parâmetros avaliados da água bruta.....	58
Tabela 9 - Percentagem de absorção do carvão + CCA em relação ao carvão.....	63
Tabela 10 - Percentagem de absorção do carvão + CCA em relação ao carvão: Pico 275nm	67
Tabela 11 - Resultados da triplicada filtrada com carvão	68
Tabela 12 - Resultados da triplicata filtrada com carvão + CCA	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Aplicação da CCA em diferentes estudos e sua eficácia.....	35
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2,4D - Ácido 2,4-diclorofenoxiacético
ABA - Associação Brasileira de Agroecologia
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BET - Brunauer-Emmett-Teller
CA - Casca do arroz
CAAL - Cooperativa Agroindustrial de Alegrete
CCA - Cinza da casca do arroz
CNH- Carbono, Nitrogênio e Oxigênio
COD- Carbono Orgânico Dissolvido
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
CORSAN - Companhia Riograndense de Saneamento
DPB - Desinfect by Products
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA - Estação de Tratamento de água
et al. - e outros
FAO - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
GOMNDI - Grupo de Óptica, Micro e Nano fabricação de Dispositivos
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IDH - Índice de Desenvolvimento Humano
NBR - Norma Brasileira
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura
MOD- Matéria Orgânica Dissolvida
OMS - Organização Mundial da Saúde
ONU - Organização das Nações Unidas
pH - Potencial de hidrogênio
SABESP - Companhia de Saneamento Básico de São Paul
SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UNICEF - Fundo das Nações Unidas para a Infância
UE - União Europeia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	Saneamento básico	16
2.2	Processo de filtração	20
2.3	Contaminantes emergentes	22
2.3.1	Uso de agroquímicos	24
2.3.2	Legislação	26
2.4	Processo de adsorção	29
2.5	Materiais adsorventes de biomassa	31
2.6	Casca do arroz e cinza da casca do arroz	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	Etapa 1: Caracterização dos materiais do sistema de filtração	38
3.1.1	Agregados	38
3.1.2	Materiais de adsorção	40
3.2	Etapa 2: Preparação dos sistemas aquosos	40
3.3	Etapa 3: Montagem dos protótipos e Execução da Filtração	43
3.4	Etapa 4: Espectrofotometria na região do Ultravioleta/Visível – UV/Vis	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Caracterização dos materiais do sistema de filtração	52
4.2	Caracterização da molécula 2-nitrofenol	55
4.3	Caracterização da água do rio	56
4.4	Montagem das colunas e filtração	58
4.5	Amostras Filtradas	60
4.5.1	Caso 01- Água destilada	61
4.5.2	Caso 02- Água bruta	64
5	CONCLUSÕES	70
	REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

O planeta no qual o ser humano está inserido tem experimentado uma série de transformações significativas em relação à sua funcionalidade natural. As mudanças climáticas, que antes pareciam pertencer a uma realidade distante, agora se fazem evidentes e são observadas de forma constante em quase todo mundo (ONU, 2023).

As respostas da natureza encontram-se vinculadas ao avanço das atividades antrópicas. A expansão das indústrias logo após a Revolução Industrial deu origem a uma nova realidade, caracterizada pela produção em massa de resíduos sólidos inorgânicos que começaram a dividir o espaço com os resíduos orgânicos, até então únicos, gerando consequências diretas pela sua disposição inadequada (Retondar, 2008). Na atualidade, essas atividades, intensificadas pelo fenômeno da globalização, estão entre as principais causas da poluição e degradação ambiental (Santos, C., 2005). Com isso, cada vez mais se intensifica o debate acerca do conceito de desenvolvimento sustentável, ou *green thinking*, que busca reunir medidas e estratégias voltadas à redução dos danos ambientais, inevitavelmente mais presentes na sociedade (EPA, 2024).

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), o conceito de sustentabilidade está atrelado ao desenvolvimento econômico e à equidade social, de modo que as necessidades atuais da sociedade sejam atendidas sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atender às suas próprias necessidades. Nessa linha de pensamento, a ONU criou a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, um compromisso global para garantir o progresso do desenvolvimento econômico, social e ambiental, para que a proteção dos recursos naturais seja revista até 2030 (ONU, 2023). Portanto, não cabe somente aos órgãos implementar medidas de proteção, mas ao ser humano, no seu dia a dia, trabalhar em prol de medidas contribuintes à proteção ambiental. No Brasil, a problemática do manejo de resíduos sólidos provenientes da agroindústria ganha destaque. O país, que se encontra na quarta posição dentre as nações com maior produção de grãos, é o mesmo que está na primeira posição dentre as nações com maior uso de agroquímicos do mundo (EMBRAPA, 2021; FAO, 2021).

A crescente problemática relacionada ao manejo e descarte dos resíduos destas safras é fomentada pela preocupação com os contaminantes presentes

nestas fontes (Dos Santos; Da Silva, 2007). No caso da deposição em aterros, os impactos são consequentes do desmatamento para novas áreas de depósito devido à rápida superlotação dos mesmos. Ocasionalmente, quando o descarte é feito próximo aos corpos hídricos, as consequências podem ser ainda mais abrangentes no que se diz respeito à contaminação com substâncias tóxicas nas fontes de águas residuais (Fateh *et al.*, 2021).

Dentro dessa perspectiva, é possível afirmar que os estados brasileiros fortemente alicerçados pela economia agroindustrial estão entre os mais vulneráveis às consequências decorrentes dessas práticas. O Rio Grande do Sul destaca-se especialmente devido à sua significativa produção arrozeira, a maior do país, com uma produção aproximada de 7,2 milhões de toneladas (IBGE, 2023). Quando o resíduo gerado após o beneficiamento do grão, a casca de arroz (CA), é incorporado ao processo de geração de energia, obtém-se o subproduto da casca, a cinza da casca de arroz (CCA). Considerando que a massa da CCA representa cerca de 18% da massa da CA, o processo de geração de energia resulta em mais de 250 mil toneladas de CCA, configurando assim um sério problema relacionado ao descarte inadequado desse resíduo no meio ambiente (Foletto *et al.*, 2005).

Estudos comprovaram que a CCA possui uma característica interessante no que se diz respeito à sua estrutura física: a porosidade (Hossain *et al.*, 2022). Qualidade que ganha importância na esfera científica que está cada vez mais à procura de biomassas com tal estrutura, na tentativa de solucionar o problema da poluição dos corpos hídricos (Ibrahim, 2010), principalmente no que se diz respeito à questão da presença dos contaminantes emergentes. De tal modo, pesquisas cresceram na região do Pampa gaúcho, onde se concentra grande parte da produção do grão, no intuito de levantar medidas que sejam eficientes contra a problemática da disposição do subproduto da casca de arroz (Da Rosa Lira *et al.*, 2024).

Ainda, segundo a ONU, a água é definida como recurso essencial à vida, um direito fundamental e indispensável para a dignidade e saúde da sociedade (ONU, 2024). A menção aos contaminantes emergentes é contextualizada no cenário da urbanização, industrialização e práticas agrícolas, evidenciando a presença de substâncias químicas na água provenientes dessas fontes, as quais não são adequadamente regulamentadas pelos órgãos responsáveis pelo tratamento hídrico. Em razão disso, águas residuais contendo contaminantes emergentes podem não

ser tratadas com plena eficácia, dada a vasta diversidade de substâncias provenientes de múltiplas origens, o que compromete a eficácia dos métodos convencionais de purificação utilizados nas estações de tratamento de água (ETAs) (Tejada *et al.*, 2010; Morin-Crini *et al.*, 2022).

Nesse contexto, os métodos de tratamento e descontaminação, em especial os que empregam a adsorção, ganham relevância, uma vez que materiais com estruturas porosas têm se mostrado eficazes na remoção dessas substâncias (Nascimento *et al.*, 2020).

Nas estações de tratamento de água do Rio Grande do Sul, as ETAs utilizam o material adsorvente chamado de carvão ativado (Fu, 2011; Da Silva Ries, 2019), produto que garante a remoção de uma certa quantidade de substâncias (Cimirro *et al.*, 2020). Porém, este é um material com uma relação custo-benefício e com questões logísticas não favoráveis (Barros, 2012).

Assim, o estudo proposto neste trabalho utilizando a CCA como material adsorvente de biomassa para questões de despoluição de corpos hídricos surge como possível solução para mitigar o descarte inapropriado de resíduos agroindustriais junto à ampliação da gama de materiais que possam solucionar o problema dos contaminantes emergentes nas fontes de água do consumidor, promovendo a sustentabilidade e aplicando o conceito de economia circular.

1.1 Objetivos

Os objetivos que nortearão o trabalho serão apresentados nos itens 1.1.1 e 1.1.2, respectivamente.

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência de remoção de resíduos de agroquímicos ao incorporar a CCA como material adsorvente no processo de filtração da água.

1.1.2 Objetivos específicos

- Construir um modelo reduzido do processo de filtração encontrado em estação de tratamento de águas (ETAs);

- Aprimorar o modelo de filtração incorporando CCA;
- Caracterizar o material adsorvente (CCA) em respeito à morfologia (MEV) e composição química (FRX);
- Verificar a eficiência do processo de filtração dos dois sistemas (com e sem CCA) em respeito à remoção do agroquímico 2-nitrofenol em soluções sintéticas de laboratório;
- Verificar a eficiência dos dois processos de filtração para remoção do agroquímico 2-nitrofenol em quantidade conhecida nas águas do Rio Ibirapuitã;
- Comparar os processos de filtragem para avaliar eventuais melhorias na remoção de agroquímicos utilizando a CCA.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção (itens 2.1 a 2.6) serão dissertados os principais assuntos que darão embasamento teórico para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Saneamento básico

De acordo com a Lei de Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico (Lei nº 11.445 de 2007), atualizada pela Lei 14.026 de 2020, define-se saneamento básico como um conjunto de medidas e infraestruturas voltadas para a gestão da água, esgotamento sanitário, controle de resíduos sólidos e drenagem urbana, de modo a assegurar a qualidade ambiental e as necessidades básicas da população (Brasil, 2007; Brasil, 2020). A Organização Mundial da Saúde (OMS) e o Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) consideram o saneamento como uma premissa básica para o desenvolvimento e consolidação da saúde pública, atuando como agente crucial na prevenção da propagação de agentes patogênicos e na incidência de enfermidades de veiculação hídrica, garantindo a dignidade da população, especialmente em áreas de maior vulnerabilidade, como os países em fase de desenvolvimento (OMS, 2024; UNICEF, 2024).

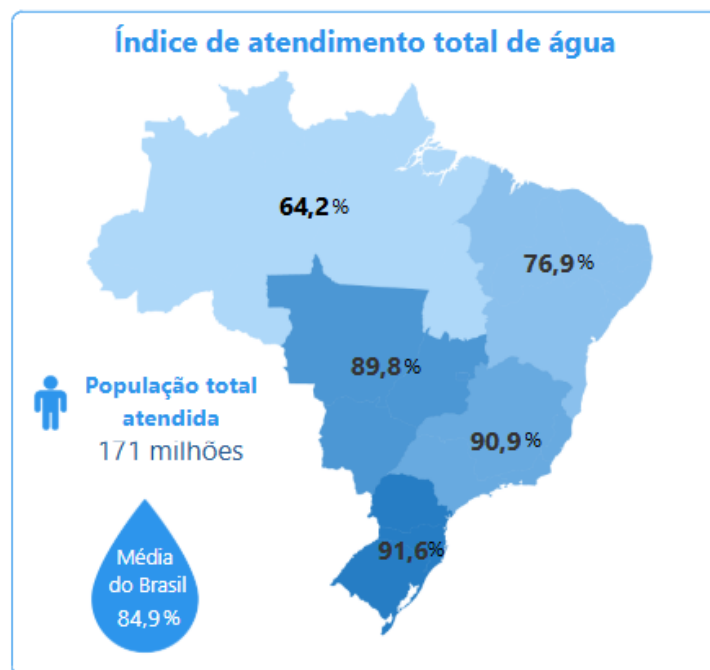
Segundo Custódio (2023), os índices de saneamento têm forte influência em muitos indicadores sociais, tais como taxa de mortalidade infantil, renda per capita e índice de desenvolvimento humano (IDH), evidenciando que a ampliação dos acessos aos serviços de saneamento é um fator crucial para o desenvolvimento dos padrões relacionados à qualidade de vida. O significativo papel do saneamento básico foi reconhecido como um agente promissor no avanço dos sistemas de saúde da sociedade moderna, e desde então, houve um considerável aumento no número de estudos e análises do impacto dessa intervenção pública. Particularmente, em seus estudos, Esrey, Feachem e Hughes (1985) enfatizam a evolução na saúde pública, demonstrando que o acesso ao saneamento básico em países desenvolvidos teve grande influência na redução e controle de doenças na década de 1930, tais como diarreia, febre tifoide e cólera.

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) é considerado um influente sistema de coleta que tem o intuito de monitorar e fornecer informações sobre os serviços de saneamento, sendo fundamental para o estabelecimento de

políticas públicas eficazes (Brasil, 2024). De acordo com informações do SNIS, em 2022, o Brasil ainda apresentava cerca de 15,8% da população sem acesso à água tratada, ou seja, mais de 32 milhões de brasileiros ainda não tinham acesso a esse recurso básico (Brasil, 2024). A Figura 1 ilustra o acesso à água tratada no Brasil por região, com destaque negativo para as regiões de maior vulnerabilidade econômica, como Norte e Nordeste, onde cerca de 20 a 30% da população ainda carece de tais recursos.

O problema da desigualdade da infraestrutura de saneamento e seus desafios no Brasil pode estar relacionado ao fenômeno de segregação étnica e às condições socioeconômicas de uma parcela específica da população (Dos Santos Santos, 2013; Silva, 2007).

Figura 1 - Distribuição de água tratada por região



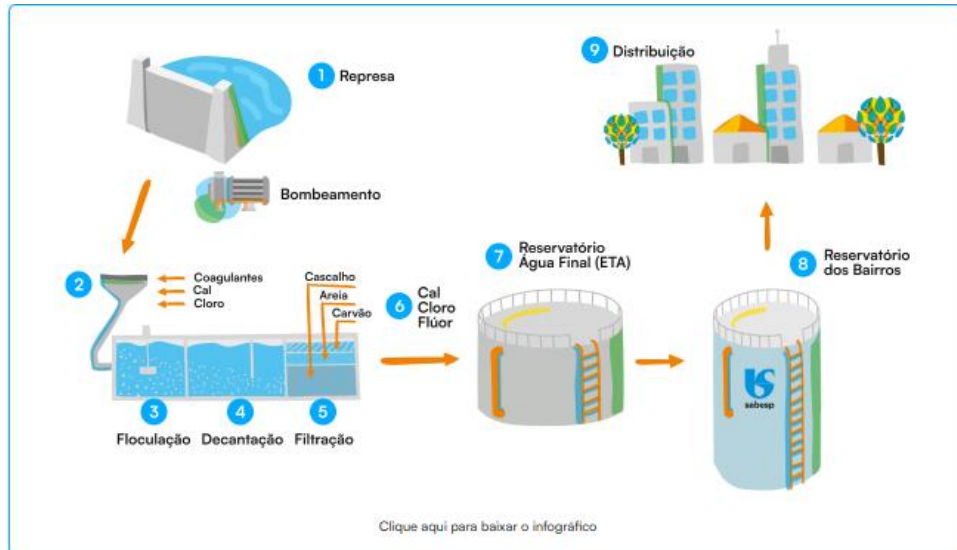
Fonte: Ministério das Cidades sobre o SNIS.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) é o principal órgão federal responsável pela regulação e coordenação dos recursos hídricos no Brasil, o que inclui a água utilizada para abastecimento e o controle de qualidade (Brasil, 2000). O fornecimento desse recurso é um processo que exige grande complexidade técnica e infraestrutura, abrangendo diversas etapas detalhadas, com o objetivo de garantir o acesso à água potável e segura para a população.

De acordo com Heller (2008), a captação de águas superficiais de fontes como rios, lagos, reservatórios ou poços subterrâneos é o ponto inaugural do processo de abastecimento, onde a água bruta é extraída de mananciais que estejam dentro dos parâmetros aceitáveis para tratamento e distribuída pelas adutoras até as estações de tratamento de água (ETAs), onde posteriormente será submetida a processos sofisticados para remoção de impurezas, de modo a torná-la potável.

Conforme a Resolução 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), são estabelecidos critérios e procedimentos relacionados à água e os fatores de escolha para as tecnologias de tratamento (Brasil, 2005). No estado do Rio Grande do Sul, as estações de tratamento de água (ETAs) possuem tratamento convencional (ciclo completo), ou seja, são estações cuja sistemática de tratamento de água inclui as etapas denominadas: pré-tratamento, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Processos do tratamento da água em uma ETA



Fonte: Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (Sabesp), 2018.

Em seus estudos, Heller (2008) e Di Bernardo; Dantas (2006) discutem sobre o manejo da água nas ETAs e a sistemática das seguintes etapas:

- **Pré-tratamento:** ponto inicial do tratamento da água, cujo principal objetivo é a redução ou remoção da significativa carga de sólidos da água bruta, tais como lodo, argila, matéria orgânica e microrganismos. Também é realizada a oxigenação

da água com desniveis que gerem a produção de pequenas cascatas, permitindo que substâncias dissolvidas na água reajam com o oxigênio e se transformem em compostos solúveis.

- **Coagulação:** etapa em que são adicionados produtos químicos chamados agentes coagulantes, tais como sulfato de alumínio e cloreto férrico, que atuam promovendo a aglutinação de partículas finas e dissolvidas na água.

- **Floculação:** neste processo, a água é agitada lentamente para permitir que os flocos formados se agrupem.

- **Decantação:** o processo de decantação consiste em deixar que as partículas sólidas pesadas criadas no processo de floculação se depositem no fundo do tanque pela ação da gravidade.

- **Filtração:** nesta etapa, a água é filtrada para remover partículas finas e microrganismos que não foram eliminados durante a decantação.

- **Desinfecção:** por fim, a desinfecção com o uso de cloro, ozônio ou luz ultravioleta é a última etapa, a qual elimina patógenos e assegura a segurança microbiológica. Após, é realizada a fluoretação da água, um meio eficaz de controle da cárie dental (Heller, 2008; Di Bernardo; Dantas, 2006).

Após todo o processo, a água tratada é armazenada em reservatórios e distribuída através de uma rede de tubulações até os consumidores. De acordo com a Portaria de Consolidação nº5/2017 do Ministério da Saúde, o abastecimento público deve atender parâmetros organolépticos (sem odor), físicos (cor e turbidez), químicos (substâncias nocivas) e biológicos (sem patógenos) para a água tratada. São citados na Tabela 1 os limites de alguns dos principais parâmetros de qualidade (Brasil, 2017).

Tabela 1 - Parâmetros de potabilidade da água

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido (VMP)
Condutividade Elétrica	µS/cm	sem limites
Turbidez	uT	1
pH	-	6 a 9,5
Cor	Uh	15
Cloretos	mg/L	250
Coliformes totais	-	Ausência em 100mL

Fonte: Adaptado da Portaria nº5/2017 do Ministério da Saúde.

Para a garantia dos parâmetros estabelecidos pelo CONAMA, é necessário que a etapa da filtração possua controles rígidos de qualidade (Libânio, 2008).

2.2 Processo de filtração

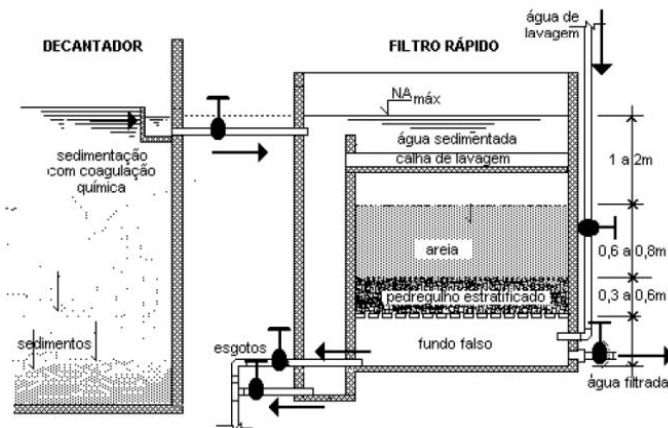
Conforme relatado, no tratamento convencional, a etapa de filtração constitui a fase final no processo de remoção de partículas suspensas ou coloidais da água através do uso de uma camada filtrante com material poroso (areia, carvão, etc.) (Medeiros Filho, 2009). A filtração é considerada uma etapa de suma relevância, visto que falhas eventualmente ocasionadas nas etapas anteriores (coagulação, floculação e decantação) podem ser corrigidas neste processo. Além disso, Libânio (2008) também destaca este processo pela possibilidade de averiguar a total remoção das partículas responsáveis pela cor e turbidez, que, se ainda presentes, podem comprometer a eficácia das etapas seguintes como a desinfecção. Contudo, esta etapa se consolida como a responsável direta pela potabilidade do líquido, certificando que a água alcance padrões elevados de qualidade antes de chegar às moradias da população (Libânio, 2008).

A filtração pode ser realizada por processos biológicos, denominando-se filtração lenta, ou através de processos físicos, químicos e físico-químicos, denominando-se filtração rápida (Vianna, 2010). Este processo nas ETAs ocorre geralmente em filtros rápidos, isto porque este método pode operar com maiores taxas de filtração se comparado à dos filtros lentos, favorecendo a segurança contra agentes patógenos (Wajsman, 2014). A estrutura destes filtros nas ETAs pode ser composta de diferentes camadas de areia de tamanhos variados, antracito, carvão ativado ou mídias sintéticas. Cada material possui um papel específico na remoção de partículas e compostos orgânicos presentes na água, sendo a areia fina geralmente responsável pela retenção das partículas menores e o carvão ativado, por ser um material adsorvente de biomassa, utilizado para a adsorção de substâncias químicas (Tchobanoglous; Burton; Stensel, 2003)

Os filtros rápidos podem ser classificados em filtros de camada filtrante simples ou dupla. No caso dos filtros de camada filtrante simples, estes são compostos por uma camada de areia, com altura que varia entre 60 e 80 cm e espessura mínima de 45 cm, sendo o tamanho efetivo dos grãos de areia entre 0,45 mm e 0,55 mm. Já os filtros de camada filtrante dupla consistem em camadas de

areia, com altura variando de 0,15 a 0,30 m, sobrepostas a uma camada de carvão antracito, com altura que varia entre 0,45 e 0,70 m. Adicionalmente, é possível incluir uma camada de suporte, composta por seixos rolados, com espessura entre 0,30 e 0,55 m (Libânio, 2008). A Figura 3 ilustra o processo de filtração com filtro rápido em uma estação de tratamento de água (ETA).

Figura 3 - Esquemática do processo de filtração



Fonte: LIBÂNIO (2008).

De acordo com (Heller, 2008), “a filtração em meio granular é o resultado da ação de três mecanismos: transporte, aderência e desprendimento”. O mecanismo de transporte tem como objetivo conduzir as partículas suspensas presentes no líquido para as proximidades da superfície dos grãos da camada filtrante (coletores). Quando estas partículas estão muito próximas dos coletores, é possível para as forças de ação superficiais promoverem a aderência à superfície dos grãos.

Conforme a sistemática do processo de filtração contínua, as partículas que foram removidas ficam acumuladas nas superfícies dos coletores, provocando a diminuição do espaço intergranular e, conseqüentemente, causando o desprendimento (Heller, 2008).

Por fim, para acontecer o desprendimento total e o arrasto das partículas para outras camadas do sistema de filtragem, possibilitando reutilizar o material para repetir o ciclo, é necessário que o módulo da força de cisalhamento atuante sobre o material depositado seja superior ao das forças adesivas atuantes sobre o mesmo (Heller, 2008). Em suma, o fenômeno de transporte de partículas é um fenômeno físico influenciado por parâmetros que regem a transferência de massa, enquanto o fenômeno de aderência é um fenômeno químico de superfície.

Em seus estudos, Di Bernardo (1993) associa a eficácia da filtração a basicamente três grandes fatores: características da suspensão, características do meio filtrante e características hidráulicas. Em termos de suspensão, deve-se levar em conta alguns quesitos como tipo, tamanho, concentração e massa específica das partículas, temperatura e pH da água. Dentro das características do meio filtrante, deve-se considerar o tipo de material granular, tamanho efetivo e massa específica, disparidade de tamanhos e a espessura da camada filtrante. Por fim, as características hidráulicas tendem a associar-se à taxa de filtração, carga hidráulica e métodos de controle (Di Bernardo, 1993).

Ainda, os filtros podem ser classificados de acordo com características do(a):

- Material do meio filtrante: areia, carvão ou antracito; carvão e areia, etc.
- Disposição do material filtrante: camadas superiores de areia com diferentes granulometrias, camadas superpostas de areia e carvão com granulometrias diferentes etc.
- Sentido de escoamento da água: descendente, ascendente ou em ambos.
- Taxa ou velocidade de filtração: lentos ou rápidos.
- Pressão existente: depressão ou com superfície sob pressão e de gravidade ou com a superfície livre (Ghisi *et al.*, 2017).

Os filtros de carvão ativado ou antracito são usados nas estações de tratamento de água, pois interagem com possíveis substâncias químicas de origem industrial ou farmacêutica cada vez mais presentes na água bruta, chamadas de micropoluentes ou contaminantes emergentes (Kasperiski *et al.*, 2018).

2.3 Contaminantes emergentes

No início dos anos 2000, a problemática dos chamados contaminantes emergentes ganhou destaque ao redor do mundo. Estes podem ser denominados como uma ampla variedade de compostos presentes no solo, na água ou no ar, que são oriundos das atividades antrópicas (industriais, hospitalares, agrícolas, etc.) ou também de ocorrência natural presentes em plantas (Montagner *et al.*, 2017). Ocasionalmente, podem apresentar risco à biosfera por ainda não possuírem legislações de controle, fato que se deve à falta de conhecimento dos seus efeitos e

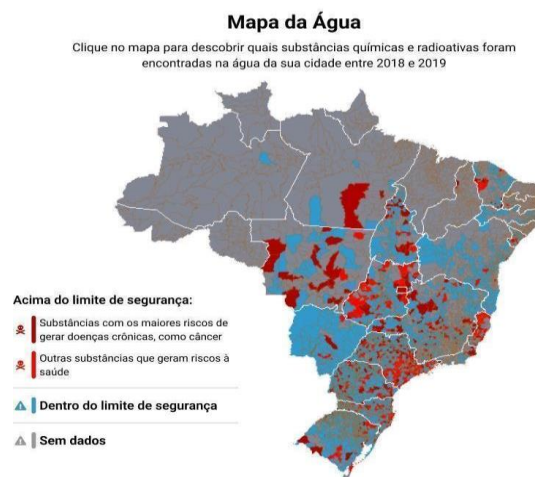
da falta de um inventário de todas as possíveis espécies químicas presentes em uma amostra (Tejada *et al.*, 2010).

Em seus estudos, Montagner *et al.* (2017) cita alguns dos mais conhecidos tipos de contaminantes emergentes como: “(...) fármacos, compostos usados em produtos de higiene pessoal (ex: protetores solares), hormônios, alquilfenóis e seus derivados, drogas ilícitas, sucralose e outros adoçantes artificiais, pesticidas; subprodutos provenientes de processos de desinfecção de águas (DPB, do inglês, *Disinfect by Products*); retardantes de chama bromados; compostos perfluorados; siloxanos; benzotriazóis; ácidos naftênicos; percloratos; dioxinas; nanomateriais; líquidos iônicos e microplásticos (...)” (Montagner *et al.*, 2017).

Tais substâncias estão presentes na rotina do ser humano e, pelas mais diversas formas, podem chegar até as águas residuais. Restos de medicamentos que não são totalmente digeridos pelo organismo podem ser excretados pelas fezes ou urinas, entrando de forma contínua nos corpos hídricos (Ankley *et al.*, 2007). Ademais, a deposição de resíduos hospitalares em aterros, o uso de substâncias químicas administradas em lavouras ou de uso na pecuária, que podem chegar às águas superficiais por intermédio das chuvas, estão entre algumas das formas do que a ação antrópica pode causar à natureza (Tejada *et al.*, 2010).

Entre 2018 e 2019, foram realizados testes pelas empresas de abastecimento de água e reunidos pelo Ministério da Saúde com intuito de mapear a presença de substâncias químicas presentes nas águas tratadas, o que pode ser observado na Figura 4, que retrata a gravidade do assunto (Brasil, 2019).

Figura 4 - Distribuição da poluição hídrica no Brasil



Fonte: Mapa da água (Brasil, 2019).

Segundo o Ministério da Saúde, entre 2014-2017 uma em cada quatro cidades brasileiras possuía água contaminada pela presença de agroquímicos (Brasil, 2017).

2.3.1 Uso de agroquímicos

Em 2021, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária do Brasil (EMBRAPA) revelou que o país ocupava a quarta posição dentre os maiores produtores de grãos no mundo com cerca de 8,2% da produção mundial conforme mostrado na Figura 5, e também, ocupou a segunda posição, conforme mostrado na Figura 6, entre os maiores exportadores de grãos no mundo (EMBRAPA, 2021).

Figura 5 - Produção anual de grãos por país

Grãos - Produção (milhões de toneladas)											
	Mundo	1º EUA	2º China	3º Índia	4º Brasil	5º Argentina	6º Rússia	7º França	8º Indonésia	9º Canadá	10º Ucrânia
2021	3.060	568	585	269	250	139	132	60	65	66	75
	-	18,6%	19,1%	8,8%	8,2%	4,5%	4,3%	2,0%	2,1%	2,2%	2,5%
2000-2021	53.661	10.511	10.020	4.797	3.375	2.005	1.880	1.370	1.229	1.174	1.101
	-	19,6%	18,7%	8,9%	6,3%	3,7%	3,5%	2,6%	2,3%	2,2%	2,1%

2021: Estimativa

Fonte: Empresa Brasileira de Agropecuária (EMBRAPA, 2021).

Figura 6 - Exportação anual de grãos por país.

Grãos - Exportação (milhões de toneladas)											
	Mundo	1º EUA	2º Brasil	3º Argentina	4º França	5º Ucrânia	6º Canadá	7º Rússia	8º Austrália	9º Índia	10º Alemanha
2021	673	148	130	56	30	56	35	54	16	13	11
	-	22,0%	19,3%	8,4%	4,5%	8,3%	5,2%	8,0%	2,4%	1,9%	1,6%
2000-2021	9.776	2.635	1.277	813	644	541	537	515	431	230	223
	-	27,0%	13,1%	8,3%	6,6%	5,5%	5,5%	5,3%	4,4%	2,3%	2,3%

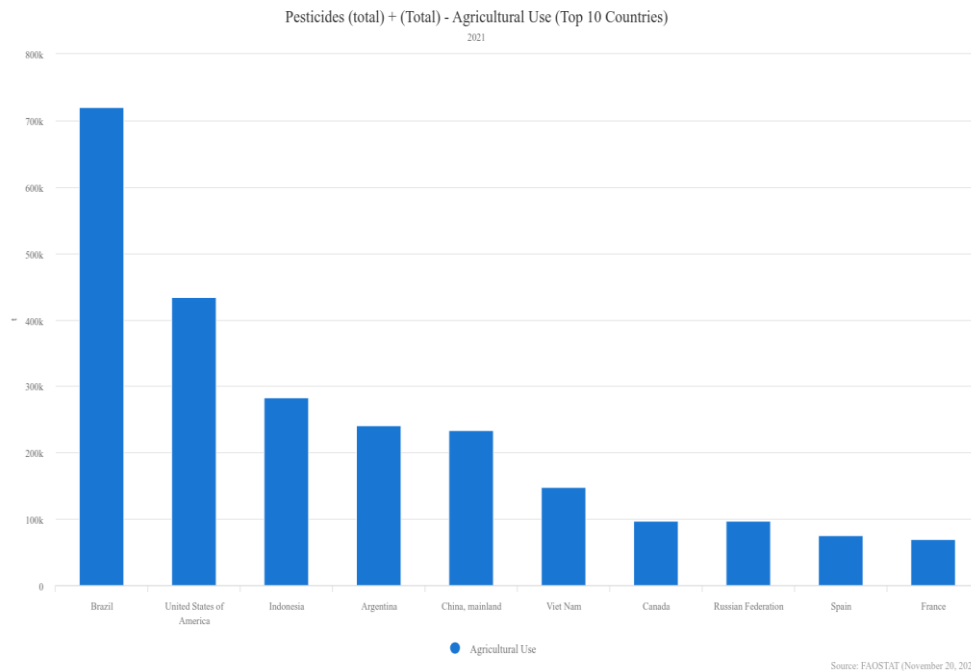
2021: Estimativa

Fonte: Empresa Brasileira de Agropecuária (EMBRAPA, 2021).

Com uma produção agrícola em larga escala, junto à evolução e intensificação do processo de globalização, pode-se dizer que o aumento do uso de agroquímicos e fertilizantes se torna cada vez mais comum nas áreas agrícolas do território brasileiro (Britto, 2015). Estes produtos químicos são utilizados no meio agrário devido à sua eficácia no controle de pragas, organismos e agentes patogênicos que possam prejudicar os insumos agrícolas (Bohner *et al.*, 2011) e, para nutrir a população, faz-se necessário o controle de tais fatores prejudiciais.

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) divulgou, em 2021, que o Brasil é, de fato, o país que mais utiliza agrotóxicos no mundo, sendo aproximadamente da ordem de 720 mil toneladas, conforme mostrado na Figura 7 (FAO, 2021). Entretanto, o uso dos mesmos, de forma difusa, intensifica drasticamente a contaminação dos recursos hídricos (Britto, 2015).

Figura 7 - Países com maior uso de agrotóxicos no mundo



Fonte: Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2021).

O aumento da produtividade agrícola é, sem dúvidas, devido ao controle que esses produtos proporcionaram. Porém, o uso desordenado destes intensifica os impactos ambientais, pois, além da permanência de resíduos no solo, eles podem contaminar a água (Dos Santos; Da Silva, 2007). O ambiente aquático é atingido quando, por intermédio das precipitações seguidas do escoamento superficial e do fenômeno da lixiviação, as partículas de agrotóxicos presentes no solo são carregadas até os corpos hídricos superficiais, podendo alcançar o lençol freático quando o escoamento é subterrâneo. Neste, a descontaminação se torna mais difícil (Edwards, 1973; Dos Santos; Da Silva, 2007). Nos últimos anos, foi notado um aumento da presença de pesticidas nos aquíferos, sendo motivo para ser um dos principais debates ambientais (Ahmad *et al.*, 2010).

Em seus estudos, Bortoluzzi *et al.* (2007) relatam que, eventualmente, estes contaminantes podem chegar a fontes de águas potáveis. A ampla variedade de

pesticidas em uso dificulta a consolidação de um único método de remoção dos mesmos (Ahmad *et al.*, 2010), o que pode ser um problema nas estações de tratamento de água (ETAs).

Segundo dados divulgados pela Associação Brasileira de Agroecologia (ABA), em apenas um copo de água potável pode haver a presença de até 27 tipos diferentes de agrotóxicos, realidade que retrata a situação de um em cada quatro municípios brasileiros, localizados em estados como Tocantins, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Santa Catarina. Os dados alarmantes foram considerados como uma questão de direitos humanos, enfatizando que grande parte dos agroquímicos encontrados na água possuem concentração além do limite ou até mesmo são proibidos na União Europeia, por exemplo (Fiocruz Brasília, 2019).

Dentre tais agroquímicos, um que ganha destaque pela sua frequência em corpos hídricos é o 2-nitrofenol. Este é um contaminante orgânico que pode ser utilizado como intermediário na síntese de fármacos, pesticidas e corantes sintéticos. Caracteriza-se por possuir baixa biodegradabilidade e alta toxicidade, podendo causar sérios danos ao meio ambiente (Pauletto *et al.*, 2021). Os micropoluentes, a exemplo do 2-nitrofenol, possuem a capacidade de atravessar as barreiras convencionais presentes nas estações de tratamento de águas residuais, tornando os métodos tradicionais pouco eficazes, o que evidencia o aumento da sua detecção nas fontes de água (CUI *et al.*, 2016).

2.3.2 Legislação

A qualidade da água atende a parâmetros definidos por regulamentações e diretrizes estabelecidas por órgãos de controle, como a Organização Mundial da Saúde (OMS) e o Ministério da Saúde do Brasil. A Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde, estabelece os padrões de potabilidade da água para consumo humano no Brasil. Ela regulamenta os parâmetros de qualidade da água potável, definindo os limites máximos permitidos para uma série de substâncias e parâmetros físicos, químicos e microbiológicos presentes na água (Brasil, 2017).

Até um pouco mais de duas décadas atrás, a preocupação com a qualidade da água concentrava-se nos contaminantes que causavam cor, odor, turbidez e microrganismos como bactérias, cistos de protozoários e ovos de helmintos,

considerados os principais vilões que poderiam alterar a qualidade da água. Hoje, a preocupação é ainda maior, visto que, mesmo quando a água é submetida ao tratamento, pode conter outros contaminantes tão prejudiciais quanto os citados e que, mesmo em baixas concentrações, podem causar sérios danos à biota aquática (Montagner *et al.*, 2017).

Dado determinado contexto social com a presença dos contaminantes emergentes nos corpos hídricos brasileiros, é de responsabilidade do Estado realizar a regulamentação adequada dos padrões de potabilidade da água de modo a adequar-se à nova realidade social. Assim, a Portaria nº 888, de 4 de outubro de 2021, altera e atualiza a Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde, com o objetivo de atualizar e modernizar a legislação relacionada à qualidade da água potável, incorporando novos avanços científicos, necessidades sanitárias e melhores práticas de controle da qualidade da água (BRASIL, 2021). As mudanças abrangem diversos pontos, incluindo novos limites para substâncias químicas, parâmetros microbiológicos e novos contaminantes emergentes (De Oliveira *et al.*, 2022).

Como é possível observar pela Portaria nº 888/2021, a tabela integral da resolução foi atualizada e alguns agroquímicos já começaram a ser monitorados e legislados em termos de quantidade máxima presente na água potável. Por outro lado, inúmeros outros ainda não receberam a classificação, como o 2-nitrofenol, outro poluente emergente de grande significância (Brasil, 2021). A Tabela 2 é uma adaptação realizada com a extração de alguns parâmetros da Portaria nº888/2021, conforme mostrado abaixo.

Tabela 2 - Controle de substâncias nocivas na água tratada

Parâmetro	Tipo	Unidade	Valor Máximo Permitido para potabilidade (VMP)
Coliformes Totais	Bactérias	-	Ausência em 100ml
<i>Escherichia coli</i>	Bactéria	-	Ausência em 100ml
Oxigênio	Substância química	-	Não estabelece limite
2,4 D	Agroquímico	µg/L	30,0
Aztrazina + S-Clorotriazinas	Agroquímico	µg/L	2,0
Glifosato + AMPA	Agroquímico	µg/L	500,0
Benzeno	Substância Orgânica	µg/L	5,0
Diclorometano	Substância Orgânica	µg/L	20,0
Chumbo	Substância Química Inorgânica	mg/L	0,01
Cobre	Substância Química Inorgânica	mg/L	2,0
Fluoreto	Substância Química Inorgânica	mg/L	1,5
Mercúrio Total	Substância Química Inorgânica	mg/L	0,001

Fonte: Adaptado da Portaria nº888/2021 do Ministério da Saúde.

No Brasil, a Resolução nº 430/2011 do CONAMA, que complementa a Resolução nº 357, estabelece o limite máximo de concentração de fenóis totais em 0,5 mg/L para qualquer tipo de efluente (Conama, 2011). Esse limite, entretanto, apresenta uma discrepância significativa em relação aos padrões definidos por algumas agências reguladoras internacionais. Por exemplo, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US-EPA) estipula um limite de 1 µg/L para águas superficiais (Al Bakain, 2014; Álvarez-Torrellas, 2017).

Além disso, a ausência de regulamentação específica para o controle do 2-nitrofenol na Portaria nº 888 e o elevado limite permitido para fenóis totais pela Resolução nº 430 podem representar riscos consideráveis à saúde pública no Brasil.

No entanto, estas normas podem não refletir todos os riscos potenciais associados a contaminantes que são de difícil detecção ou para os quais os efeitos de longo prazo ainda não são completamente compreendidos (OMS, 2017). Assim, a presença de contaminantes dentro dos limites regulamentares não garante a

ausência de risco, e as regulamentações podem precisar ser ajustadas com base em novas pesquisas e evidências. Contudo, evidencia-se que diferentes famílias de contaminantes químicos podem não ser completamente eliminadas pelos processos tradicionais usados no saneamento, exigindo métodos mais avançados, como a ozonização ou a utilização de carvão ativado e biomassas em processos de adsorção (Lin *et al.*, 2020).

2.4 Processo de adsorção

Conforme já relatado anteriormente, eventualmente os contaminantes chegam às fontes hídricas, podendo apresentar uma ampla gama de poluentes que possuem resistência a métodos de degradação biológica e a métodos convencionais de tratamento. Assim, a adsorção tem ganhado destaque como um importante processo de purificação de águas (Nascimento *et al.*, 2020).

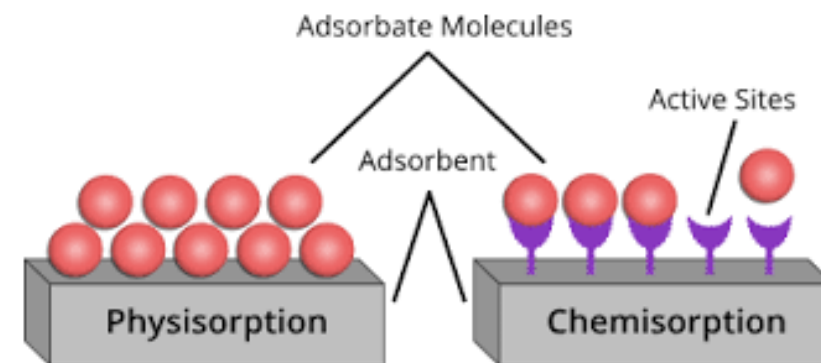
Em seus estudos, Ruthven (1984) definiu o processo de adsorção como sendo um processo de transferência de massa, no qual se investiga a capacidade de determinados sólidos em acumular, em sua superfície, substâncias presentes em fluidos gasosos ou líquidos, facilitando assim a segregação dos componentes desses fluidos (Ruthven, 1984). A adsorção pode ser entendida como uma operação unitária que envolve o contato entre uma fase líquida e uma sólida, resultando numa transferência de massa da fase fluida para a superfície do sólido, ocorrendo uma acumulação de uma substância sobre a superfície da outra. Dessa forma, quanto maior for a área superficial disponível por unidade de massa do adsorvente, ou seja, sua porosidade, mais eficiente e favorecido será o processo de adsorção (Francischetti *et al.*, 2004). A espécie que se acumula na interface do material é normalmente denominada adsorvato ou adsorbato, e a superfície sólida na qual o adsorvato se acumula chama-se adsorvente ou adsorbente (Ruthven, 1984).

A adsorção pode ser subdividida em duas categorias principais com base na intensidade das forças que a regem: adsorção física e adsorção química. No caso da adsorção física (fisissorção), a atração entre o adsorvato e a superfície do adsorvente é mediada por interações relativamente brandas, comumente associadas às forças de Van der Waals, as quais possuem uma natureza análoga às forças de coesão molecular. Em contraste, a adsorção química (quimissorção) envolve ligações substancialmente mais intensas, originadas pela formação de novas

conexões químicas que resultam principalmente da transferência ou compartilhamento de elétrons entre as moléculas do adsorbato e a superfície do adsorvente, conforme observado na Figura 8 (Nascimento *et al.*, 2020).

Em diversos cenários, a adsorção química é irreversível, dificultando consideravelmente a separação do adsorbato do adsorvente, como apontado por diversos autores (Nascimento *et al.*, 2020).

Figura 8 - Esquematização da fisissorção e da quimissorção



Fonte: (PSIBERG, 2024).

Em processos industriais, a fisissorção se torna o processo mais interessante, primeiramente para propiciar maior remoção de moléculas de adsorbato e, principalmente, para possibilitar a sucessiva remoção (lavagem) do mesmo, permitindo a reutilização do material adsorvente. Por ser um processo que depende unicamente das interações de superfície entre adsorvente e adsorbato, características como grande área superficial, volume de poros elevados e a presença de grupos químicos específicos se tornam essenciais para a escolha do material adsorvente mais adequado e eficiente (Brito, 2022; Claudino, 2003).

Além disso, este processo adsorptivo possui vantagem em relação a outras técnicas de purificação da água no que diz respeito ao seu baixo custo inicial, flexibilidade e facilidade de operação. Entretanto, para a eficácia deste método, é preciso escolher um material adsorvente de alta seletividade/capacidade, com longa vida útil e que esteja disponível de forma abundante e a um baixo custo na natureza (Figueiredo *et al.*, 2000). Quando tais materiais forem utilizados, este processo pode ser chamado de bioadsorção ou biossorção, denominação específica para a utilização de materiais bioadsorventes na remoção de um soluto de soluções aquosas (Cunha *et al.*, 2022).

A biossorção é considerada de baixo custo em relação a: (i) abundância na natureza do material, (ii) exigência de menor ou nenhum tratamento para sua utilização, (iii) ausência de desperdício material e (iv) eventual uso de subprodutos de outras indústrias (Kasperiski *et al.*, 2018). Entre os materiais bioadsorventes mais utilizados está o carvão ativado oriundo de diferentes fontes naturais, como casca de coco, bagaço de cana, entre outros (Lima *et al.*, 2019). Porém, em razão de seu alto custo e dificuldade de regeneração, torna-se razoavelmente inviável e, para a melhor eficácia desta técnica, surge a necessidade de estudos em novos bioadsorventes com maior potencial (Barros, 2012).

2.5 Materiais adsorventes de biomassa

Cada vez mais, o conceito de biomassa a partir de resíduos agrícolas vem sendo explorado, impulsionado pelos preceitos da química verde, sustentabilidade e economia circular. Nesse contexto, a biomassa pode ser definida como o conjunto de todos os recursos renováveis provenientes da matéria orgânica, seja de origem vegetal ou animal, que possuam potencial de geração de energia (ANEEL, 2008).

A EMBRAPA a caracteriza como uma matéria-prima de baixo custo e rápido acesso, com grande potencial energético, sendo uma das fontes que podem facilitar a geração de energia em grande escala, apoiando o desenvolvimento sustentável (EMBRAPA, 2016). A geração de energia por intermédio dessa fonte contribui para mitigar a dependência de combustíveis fósseis e hidrelétricas, além de favorecer o aproveitamento de resíduos culturais (EMBRAPA, 2016).

No entanto, a biomassa tem sido cada vez mais vista como uma fonte de oportunidades para outros fins. A elevada produção de resíduos agroindustriais no país e sua disposição final trouxeram à tona técnicas que permitem a utilização desses materiais como potenciais adsorventes de contaminantes no processo de despoluição de ambientes aquáticos (Inyang *et al.*, 2012). O uso desses materiais surge como um método alternativo para seu reaproveitamento, mitigando os danos ambientais decorrentes de seu descarte inadequado (Lucena *et al.*, 2012).

A maioria dos adsorventes possui uma estrutura porosa que resulta em um grande aumento da área superficial de contato, o que potencializa a eficiência do processo de adsorção, visto que este é um fenômeno de superfície (Nascimento *et al.*, 2020). O uso de adsorventes à base de biomassa no tratamento de sistemas

aquosos tem se tornado uma abordagem cada vez mais comum devido à sua eficácia (Kumar & Gaur, 2018). Dentre os diversos materiais estudados, a Tabela 3 apresenta alguns exemplos de biomassa com potencial adsorvente.

Tabela 3 - Exemplos de materiais adsorventes de biomassa

Biomassa	Material Adsorvente	Contaminantes removidos	Referência
Resíduos de vagens da Semente de Pau Ferro (<i>Caesalpinia Ferrea</i>)	Carvão ativado	Captopril (Fármaco)	(Kasperiski <i>et al.</i> , 2018).
Resíduos agroindustriais de cápsulas do caju-do-pará (<i>Bertholletia excelsa</i>)	Carvão ativado	Amoxicilina (Fármaco)	(Lima <i>et al.</i> , 2019).
Resíduos agroindustriais do arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Casca de arroz	Íons de Cobalto (Co^{2+}) e níquel (Ni^{2+})	(Penha <i>et al.</i> , 2016).
Resíduos agroindustriais do arroz (<i>Oryza sativa</i>)	Cinza da casca do arroz	Nitrofenol	(Da Rosa Lira <i>et al.</i> , 2024).
Resíduos industriais do bagaço de cana-de-açúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar	Íons de cobre (Cu^{2+}) e cromo (Cr^{3+})	(Ferreira <i>et al.</i> , 2015).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A busca por alternativas aos métodos convencionais, que combinem baixo custo e alta eficácia, tem estimulado, nos últimos anos, o estudo de novos materiais adsorventes derivados da biomassa em sistemas de adsorção (Ibrahim, 2010). Dentre esses materiais, os carvões ativados têm se destacado devido à sua estrutura porosa, composta por camadas de carbono hidrofóbico e grupos funcionais hidrofílicos, que conferem alta eficiência na remoção de poluentes da água (Fu, 2011; Da Silva Ries, 2019).

Na Região Sul do Brasil, um material que vem ganhando atenção é a CCA, um subproduto gerado em larga escala e frequentemente descartado sem uma destinação adequada. A casca de arroz, quando submetida a processos térmicos controlados, resulta em uma cinza com estrutura porosa e propriedades favoráveis à adsorção (Da Rosa Lira *et al.*, 2024). O carvão produzido a partir dessa biomassa, conhecido como *biochar*, tem sido amplamente estudado para aplicações ambientais, como o tratamento de águas e solos (Kadirvelu & Namasivayam, 2000).

Além disso, mesmo quando calcinada em condições não ideais para a formação de *biochar* (como em atmosfera não inerte), a CCA, rica em sílica, demonstrou ser um adsorvente eficiente na remoção de agroquímicos e poluentes orgânicos industriais (Da Rosa Lira *et al.*, 2024). Esse potencial reforça a viabilidade do aproveitamento de resíduos agroindustriais na descontaminação de ambientes aquáticos.

2.6 Casca do arroz e cinza da casca do arroz

O Brasil, país em destaque no cenário agrícola global, ocupa uma posição de relevância ao se situar entre os dez maiores produtores de arroz no mundo (Agro Sustentar, 2023). De acordo com o Levantamento Sistemático de Produção Agrícola do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2023, a produção anual foi de 10,4 toneladas. Deste valor, a grande maioria está concentrada na região sul do país, sendo o estado do Rio Grande do Sul responsável pela maior parte desta safra devido às condições favoráveis de cultivo que a região oferece, combinando fatores climáticos, qualidades do solo e infraestrutura agrícola (Gov-RS, 2024). Aproximadamente 7,2 milhões de toneladas foram geradas no estado em 2023, consolidando a produção gaúcha com cerca de 70% da produção nacional (IBGE, 2023). O arroz destaca-se como alimento mais consumido na rotina alimentar dos brasileiros, em razão de sua significativa contribuição calórica fundamental para a nutrição da população, especialmente em regiões com maior vulnerabilidade alimentar (Souza *et al.*, 2013). Porém, antes de alcançar o consumidor final, é necessário que o grão passe por alguns processos industriais de beneficiamento, que engloba o processo de descascamento, onde são gerados elevados volumes de casca do arroz. A casca do arroz é comumente submetida a combustão para geração de energia, seja pela própria indústria responsável pelo beneficiamento do grão ou por outras indústrias equivalentes. No processo de geração de energia é gerado então um novo subproduto, a CCA, rico em sílica (SiO_2), que possui lenta biodegradação, portanto, pode contribuir com o desencadeamento de graves impactos ambientais (Foletto *et al.*, 2005).

Na falta de aplicações efetivas, a CCA é descartada em aterros sanitários ou depositada em depósitos a céu aberto que, além de afetar a biosfera, pode acarretar danos à saúde pública. No caso de descarte em aterros, a CCA e a CA podem

contribuir com a superlotação desses locais em curtos intervalos de tempo, o que demanda ampliação dessas áreas de descarte, fomentando o desmatamento e a poluição. Quando depositada a céu aberto, além de também ocupar grandes áreas, pode contribuir com a poluição de corpos hídricos devido às substâncias geradas durante sua decomposição (Fateh *et al.*, 2021), como a nanosílica.

Diante disso, a utilização da CCA como matéria-prima em produtos ou processos tem ganhado interesse no meio acadêmico, com intuito de mitigar os danos ambientais causados pela destinação do subproduto. Em seus estudos, Da Rosa Lira *et al.* (2024) e Gonçalves *et al.* (2009) classificam este subproduto agroindustrial como um eficaz material adsorvente de biomassa em razão de suas propriedades físico-químicas. Assim como Kumar *et al.* (2022) e Li *et al.* (2023) abordam a utilização da CCA no processo de adsorção de poluentes como metais pesados e compostos orgânicos de efluentes aquáticos contaminados. O quadro 1 contém estudos que avaliaram a eficácia deste material no processo de adsorção de contaminantes.

Contudo, a CCA se apresenta assim como um material adsorvente promissor para poder vir a implementar processos industriais de tratamentos de água, levando a vantagem de ser barata, amplamente disponível e propiciando um fim alternativo sustentável para este resíduo (Da Rosa Lira *et al.*, 2024).

Quadro 1 - Aplicação da CCA em diferentes estudos e sua eficácia

Material adsorvente	Contaminantes removidos	Eficácia	Referência
Sílica da CCA com lixiviação ácida e 88,95% de dióxido de silício	Agroquímicos: 2-nitrofenol e ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4 D)	Remoção de 51% para o 2,4D 10 ppm e 65% para o 2-nitrofenol 20 ppm, ambos para um pH =2.	(Da Rosa Lira <i>et al.</i> , 2024).
CCA sem tratamento prévio	Agroquímico: Imidacloprido (IMI)	Remoção de 94% da substância alíquota de 25 mL de uma solução de Imidacloprido a 2 mg L ⁻¹ e dose de adsorvente de 1 g L ⁻¹ .	(Pereira A.P, <i>et. al.</i> , 2023)
CCA tratada com ácido nítrico e 84,73% de sílica	Mistura de agroquímico: (alacloro, metolacloro, clorpirifós, fipronil, a-endosulfan, b-endosulfan e p,p0-DDT)	Remoção de 90% da substância com 0,5g de CCA para 20mL de pesticida.	(Saha <i>et al.</i> , 2014)
CCA com 49,36% sílica	Agroquímico: Atrazina	Remoção de 90% em solução contendo 0,3g CCA p/ 25mL atrazine e pH=7.	(N'diaye <i>et al.</i> , 2019)
CCA com 81,78% de sílica	Agroquímico: ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4D)	Remoção de até 90% para concentração de 50mg/L de adsorvato e 0,5g/30ml de adsorvente.	(Deokar; Mandavgane, 2015).
CCA com 81,7% de sílica lavada com água deionizada	Compostos Orgânicos: Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno (BTEX)	Remoção de 98,2% de 1mg/L de benzeno. Remoção de 99,8% de 1mg/L de Tolueno. Remoção de 100% de 1mg/L de etilbenzeno e remoção de 100% de 1mg/L de xileno. Para todas as ocasiões, a dosagem do adsorvente CCA foi igual a 20g/L com pH=8,8.	(Kieling, 2016)
CCA com 90,97% de sílica sem tratamento prévio	Petróleo	Remoção de óleos e graxas de uma solução sintética com concentração de 0,25g/L com redução de 98% para uma massa de 1,5g.	(Martins, <i>et. Al.</i> , 2021)
CCA com 75,93% de sílica sem tratamento prévio	Metal pesado: Íons Cr ³⁺	Remoção de 73,4% de cromo para uma concentração de 0,00755 Mol/L e 1g de CCA em 100 mL de solução do adsorbato.	(Pereira, 2020)
CCA moída com 90,58% de sílica	Metal pesado: Cromo Hexavalente (Cr VI)	Remoção de 60% para pH=2 e 80% para pH=1 de 10mL com 25ppm em 10g/L de CCA	Keling; Moraes; Brehm (2009)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção (itens 3.1 a 3.4) serão apresentados os materiais e métodos que foram utilizados para o desenvolvimento da pesquisa e o alcance dos objetivos.

O experimento foi executado na Universidade Federal do Pampa, no município de Alegrete, RS, com o emprego do Laboratório de Materiais de Construção Civil, do Laboratório de Óptica, Micro e Nanofabricação de dispositivos (GOMNDI) e do Laboratório de Química para realização dos ensaios.

A metodologia desta pesquisa foi estruturada com base nas informações obtidas durante uma visita técnica à Estação de Tratamento de Água (ETA) da empresa CORSAN, responsável pelo sistema de saneamento básico do município. A partir dessa visita, foi possível compreender o funcionamento da estrutura de filtração da água e os procedimentos adotados para a verificação de seus parâmetros. Dessa forma, a metodologia contemplou a reprodução de dois protótipos representativos do sistema de filtração utilizado na ETA, bem como a posterior análise dos parâmetros da água filtrada.

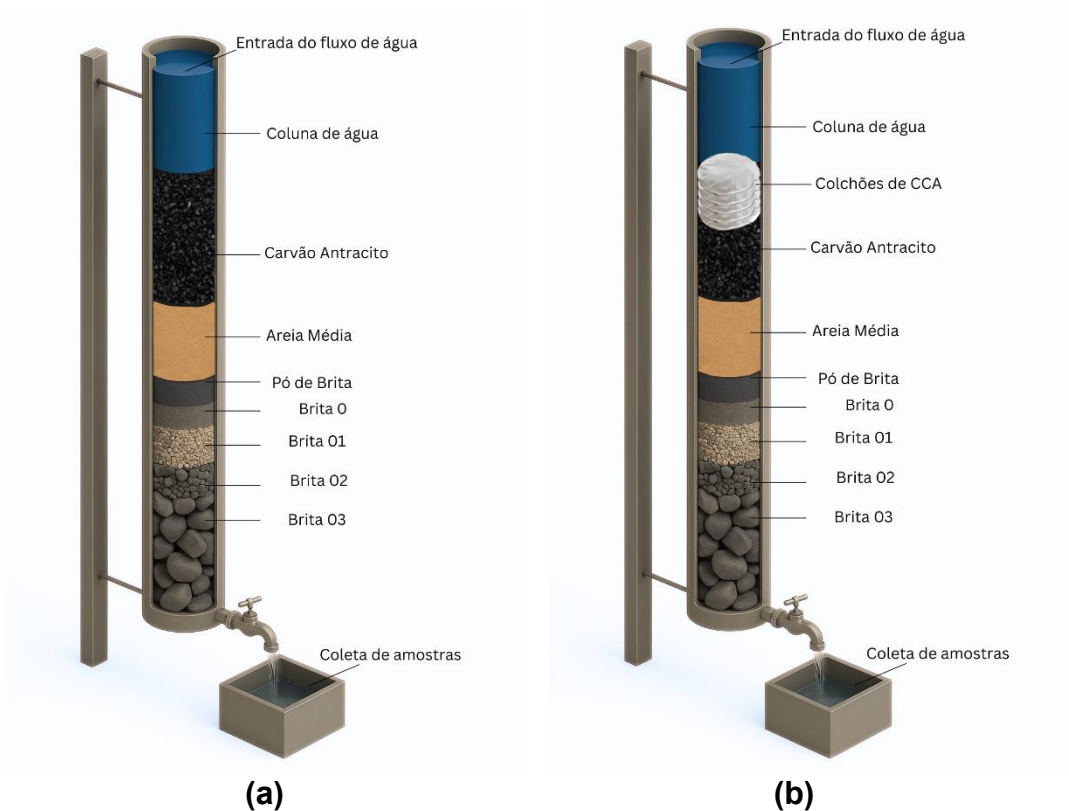
Com isso, ambos os protótipos foram projetados em tubos de policloreto de vinila (PVC) com altura equivalente a dois metros, contendo camadas filtrantes (agregados) e uma camada adsorvente (carvão antracito), com o objetivo de receber um fluxo descendente de água destilada contendo o micropolvente 2-nitrofenol. A água percolou por essas camadas com a finalidade de promover a remoção do contaminante adicionado.

Entretanto, em um dos protótipos, a camada de carvão antracito foi substituída parcialmente por um material alternativo de adsorção: a CCA, buscando-se avaliar sua eficiência comparativa na remoção do 2-nitrofenol.

As amostras da água filtrada foram coletadas e analisadas por meio de espectrofotometria na região do ultravioleta-visível (UV-Vis), com o objetivo de verificar a presença residual do micropolvente após a filtração. O mesmo procedimento experimental foi posteriormente aplicado à água bruta coletada do principal manancial da cidade, o rio Ibirapuitã, com adição do micropolvente.

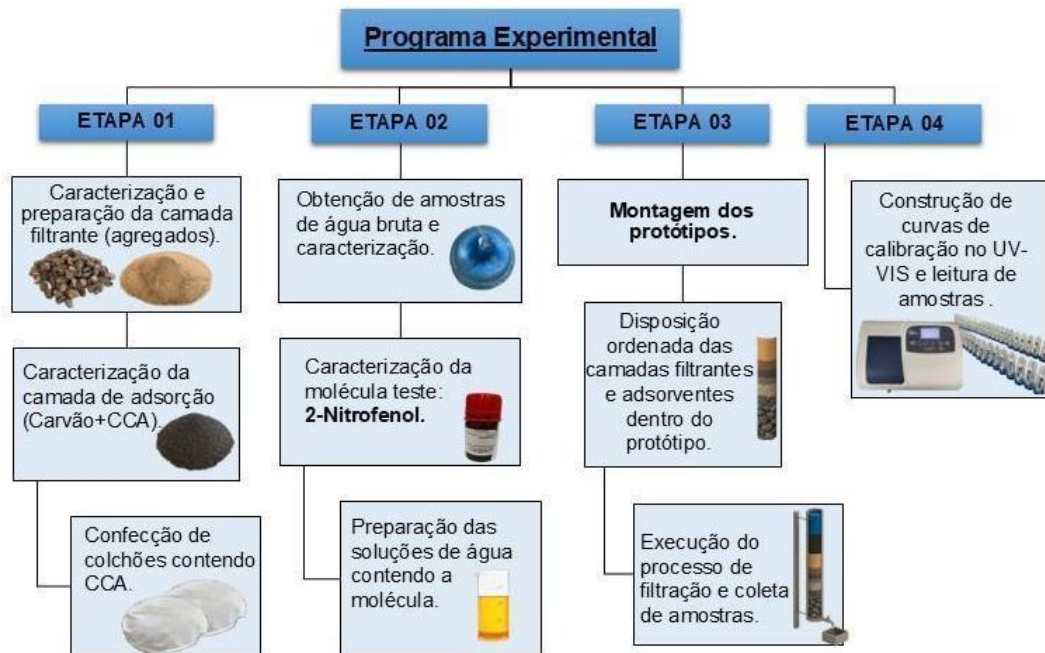
A esquematização das diferentes configurações dos protótipos está apresentada nas Figuras 9(a) e 9(b), e o programa experimental foi organizado conforme mostrado na Figura 10.

Figura 9 - (a) Esquemática do protótipo (b) Esquemática do protótipo c/ CCA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Organização do programa experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Etapa 1: Caracterização dos materiais do sistema de filtração

Esta etapa compreende o conjunto de técnicas e procedimentos envolvidos para caracterização dos agregados (separação granulométrica) e dos materiais adsorventes (CNH e MEV).

3.1.1 Agregados

A separação granulométrica dos agregados foi necessária visto que o perfil do sistema filtrante nas estações de tratamento de água (ETAs) é composto por uma sequência de camadas de agregados com faixas de diâmetros específicos. A caracterização dos materiais foi realizada no laboratório de Materiais do curso de Engenharia civil da Unipampa, campus Alegrete, RS, para que fossem encaixados nas classificações que estão contidas na NBR 7211:2022 - Determinação da composição granulométrica de agregados graúdos e miúdos. A norma determina a nomenclatura dos agregados com base na abertura das peneiras pelas quais o material passa ou é retido. A Tabela 4 foi adaptada da norma e mostra os tipos de agregados utilizados no protótipo e as faixas granulométricas em que cada um deles apresenta.

Tabela 4 - Classificação conforme a granulometria

Classificação do Agregado	Nomenclatura	Faixa Granulométrica (mm)
Graúdo	Brita 3	25-38
Graúdo	Brita 2	19-25
Graúdo	Brita 1	9,5-19
Graúdo	Brita 0	4,8-9,5
Miúdo	Pó de Brita	2,0-4,8
Miúdo	Areia	0,42-2,0

Fonte: Adaptado da NBR 7217:2022.

Neste estudo, o agregado nomeado como brita 3 foi obtido comercialmente e por isso não passou pelo processo de separação, os demais agregados foram adquiridos no mercado local, porém sem distinção granulométrica específica e, portanto, passaram pelo processo de separação para estarem de acordo com a disposição da granulometria estabelecida nas estações de tratamento.

Para a seleção das frações específicas de agregados utilizadas na montagem do sistema filtrante, foi realizado o processo de peneiramento utilizando um conjunto de cinco peneiras: 25,0 mm, 19,0 mm, 9,5 mm, 4,8 mm e 2,0 mm, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Série de peneiras utilizadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, as peneiras foram dispostas em ordem decrescente, uma sobre a outra, conforme exibe a Figura 12. Com o agregado britado posicionado na peneira superior (25mm) e submetido à agitação manual, promoveu-se a separação do material granular conforme seus tamanhos. As partículas retidas entre as peneiras de 25,0 mm e 19,0 mm foram identificadas como brita 2; entre 19,0 mm e 9,5 mm, como brita 1; entre 9,5 mm e 4,8 mm, como brita 0; e, por fim, as partículas retidas entre 4,8 mm e 2,0 mm foram classificadas como pó de brita.

Figura 12 - Sequência das peneiras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação a areia, não foi necessário realizar o peneiramento, uma vez que o material já atendia às especificações técnicas quanto à sua granulometria, caracterizando-se como agregado miúdo. No entanto, foi realizada a remoção

manual de impurezas, como torrões e matéria orgânica, com o objetivo de evitar possíveis interferências nos resultados experimentais.

3.1.2 Materiais de adsorção

Como elementos de adsorção, foram utilizados o carvão antracito e a CCA. O carvão antracito foi adquirido no comércio local na quantidade de 25kg e granulometria especificada de 0,6mm, a mesma utilizada na ETA. O carvão não passou por processos prévios antes da sua utilização.

A CCA foi obtida como doação da empresa URBANO Arroz LTDA., de São Gabriel, RS e após o recebimento, foi mantida em sacos herméticos.

A composição química dos dois materiais adsorventes foi obtida através da combinação das técnicas de CHN (Perkin Elmer, Analyzer 2400 Series II), que determina a quantidade de carbono, hidrogênio e nitrogênio presentes na amostra, e Fluorescência de Raios-X (FRX) (Panalytical, Epsilon 1, semi-quantitativa), que detecta os elementos mais pesados, com número atômico (Z) > 12 .

A análise morfológica da CCA e do carvão foi realizada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV, modelo ZEISS EVO | LS15). Essa técnica permitiu a visualização detalhada da superfície do material, fornecendo informações importantes sobre sua microestrutura externa.

Visando otimizar a eficácia da CCA como material adsorvente, e garantir que todo o fluxo de água percolasse uniformemente por esse meio sem provocar a segregação das partículas, optou-se por envolver a CCA em “colchões” confeccionados com envelopes de fibra natural de algodão, resultando em unidades com aproximadamente 4 cm de altura.

Com todo o material que compõe o sistema filtrante separado, foi possível dar início a próxima etapa.

3.2 Etapa 2: Preparação dos sistemas aquosos

Nesta etapa, foram preparadas duas variantes de sistemas aquosos (soluções), as quais foram submetidas posteriormente ao processo de filtração.

Inicialmente, para a definição do volume de água a ser utilizado, procedeu-se ao cálculo da área da seção transversal do tubo, conforme demonstrado na Equação

1. Na sequência, empregou-se a Equação 2 para a obtenção do volume total requerido. A altura destinada à coluna de água no interior do tubo foi fixada em 83 cm. A distribuição detalhada das alturas de cada componente ao longo do tubo é descrita no item 3.3.

$$\text{Assim,} \quad \text{Área (A)} = \pi * r^2 \quad (1)$$

$$A = \pi * \frac{15\text{cm}^2}{2} = 176,71\text{cm}^2$$

$$\text{Volume (V)} = \text{Área} * \text{altura} \quad (2)$$

$$V = 176,1\text{cm}^2 * 83\text{cm} = 14667,31\text{cm}^3$$

$$V = 14,66 \text{ litros}$$

Portanto, para cada uma das colunas, foram preparados 15 litros de solução no Laboratório de Química da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), campus Alegrete, RS.

Cada variedade destes sistemas foi testada em cada um dos dois protótipos, portanto, no total foram produzidos 30 litros de cada solução.

A composição de cada solução está descrita a seguir:

- *Sistema 01* – 15 litros de solução sintética composta por água destilada com adição do agroquímico 2-nitrofenol, na concentração de 80 mg/L;
- *Sistema 02* – 15 litros da solução contendo água bruta do Rio Ibirapuitã, acrescida do mesmo agroquímico e na mesma concentração de 80 mg/L.

A preparação da solução com o 2-nitrofenol foi realizada a partir do composto em sua forma pura, adquirido da marca Sigma Aldrich, conforme exibido na Figura 13.

Figura 13 - 2-nitrofenol



Fonte: Grupo de Pesquisa do autor.

A dissolução da molécula de 2-nitrofenol foi realizada no Laboratório de Química, utilizando um béquer contendo uma pequena quantidade de água destilada. A mistura foi submetida à agitação em placa com agitador magnético, até a completa solubilização do composto, sem a presença de resíduos sólidos visíveis. Após a devida dissolução da molécula de 2-nitrofenol, adicionou-se parte à água destilada e parte à água bruta do rio para alcançar a concentração já mencionada.

A água destilada foi produzida também no Laboratório de Química. O produto utilizado encontrava-se previamente preparado pela equipe técnica responsável, de acordo com os procedimentos operacionais padrão adotados pela instituição.

A coleta da água bruta foi realizada às margens do Rio Ibirapuitã, conforme ilustrado na Figura 14, no dia 27 de janeiro de 2025, totalizando um volume aproximado de 40 litros. Foi escolhido o período de verão para a coleta por ser um período de safra na região, podendo apresentar assim níveis de poluição elevados. O ponto de coleta localiza-se ao sul da ponte Borges de Medeiros, nas coordenadas geográficas $-29,786^{\circ}$ S e $-55,774^{\circ}$ W, conforme indicado por um (X) na Figura 15. A água foi armazenada em galões devidamente vedados, de forma a evitar qualquer contato com o ar, garantindo assim a preservação de suas características.

Figura 14 - Coleta de água bruta



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Localização da retirada de água bruta



Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH.

As amostras de água bruta obtidas foram deixadas decantar, permanecendo por dias sem perturbação em baldes fechados, de modo a promover a deposição das partículas sólidas presentes no fundo. Após, realizou-se a análise da água utilizando o equipamento Multiparâmetro, conforme pode ser visualizado na Figura 16, com a finalidade de verificar os parâmetros de condutividade elétrica, turbidez e pH. Os valores foram posteriormente comparados com os das amostras do rio após o processo de filtração.

Figura 16 - Medição de parâmetros com Multiparâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Etapa 3: Montagem dos protótipos e Execução da Filtração

O processo de construção dos protótipos foi realizado no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), campus Alegrete, RS. A Figura 17 apresenta os materiais utilizados

na construção dos protótipos, sendo que, para a montagem dos sistemas, foram utilizados os seguintes materiais:

- 2 tubos de PVC rígido, com 150 mm de diâmetro e 2 metros de altura;
- 2 tampões de PVC rígido, com 150 mm de diâmetro;
- 2 flanges de conexão para tubulação, com 25 mm de diâmetro;
- 2 conexões tipo joelho, com 25 mm de diâmetro;
- 2 torneiras de jardim;
- 50 cm de tela de viveiro;
- 2 anéis de vedação, com 150 mm de diâmetro;
- 1 tubo de silicone.

Figura 17 - Materiais utilizados na montagem dos sistemas



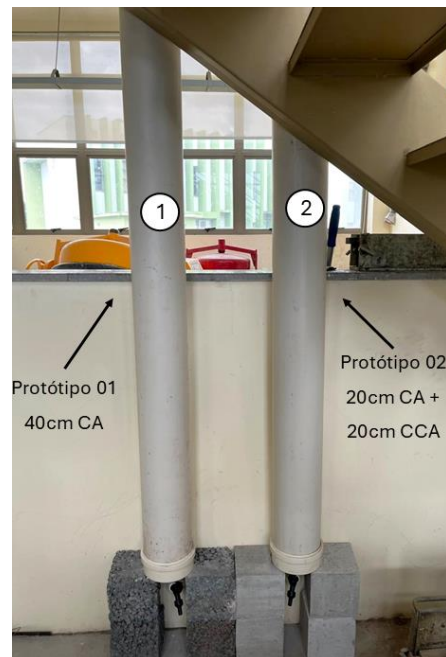
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com todos os materiais disponíveis, deu-se início à etapa de montagem dos protótipos no Laboratório de Materiais. O primeiro passo consistiu na perfuração dos tampões utilizando uma serra-copo, com o objetivo de viabilizar o encaixe das flanges. Esse procedimento foi realizado com cautela, a fim de evitar folgas no orifício que pudessem comprometer a estanqueidade e ocasionar vazamentos. Em seguida, as flanges foram acopladas a conexões do tipo joelho, as quais foram posteriormente ligadas às torneiras responsáveis pela saída do fluxo de água.

Após a montagem do sistema de escoamento, a estrutura foi fixada na base dos tubos de PVC. Para garantir a vedação e a segurança do conjunto, foram inseridos anéis de vedação nos encaixes inferiores dos tubos, promovendo aderência e evitando possíveis desprendimentos. Além disso, foi aplicada uma camada de silicone em torno dos anéis de vedação e da borda dos tampões, reforçando a estanqueidade do sistema.

Por fim, instalou-se a tela viveiro na base interna dos tubos, com a finalidade de evitar o bloqueio do orifício de saída por partículas provenientes da camada de brita, a qual compõe a base do sistema filtrante. Após essa etapa, os tubos de PVC foram fixados verticalmente junto à parede do laboratório, de modo a garantir a estabilidade estrutural e evitar que o peso das colunas comprometesse sua integridade ao longo dos ensaios. A Figura 18 exibe a estrutura montada.

Figura 18 - Construção dos protótipos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a estrutura devidamente montada, foi dado início à etapa de disposição das camadas que compõem o sistema de filtração no interior dos tubos. Cada camada foi posicionada conforme uma altura previamente estabelecida, fundamentada nos parâmetros adotados pelas Estações de Tratamento de Água (ETAs). Como diferencial, realizou-se, em um dos protótipos, a substituição parcial da camada de carvão antracito (camada adsorvente) pela CCA, com o objetivo de equiparar a capacidade adsorvente deste com substituição parcial àquele sem a adição da CCA. A sequência e as respectivas alturas das camadas encontram-se detalhadas nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Granulometria e altura das camadas: Protótipo 1

Agregado	Granulometria (mm)	Altura (cm)
Brita-03	25-38	30
Brita-02	19-25	10
Brita-01	9,5-19	7
Brita-0	4,8-9,5	5
Pó de Brita	2,0-4,8	5
Areia Média	0,42-2,0	20
Carvão Antracito	0,6	40

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Granulometria e altura das camadas: Protótipo 2

Agregado	Granulometria (mm)	Altura (cm)
Brita-03	25-38	30
Brita-02	19-25	10
Brita-01	9,5-19	7
Brita-0	4,8-9,5	5
Pó de Brita	2,0-4,8	5
Areia Média	0,42-2,0	20
CCA	-	20
Carvão Antracito	0,6	20

Fonte: Elaborado pelo autor.

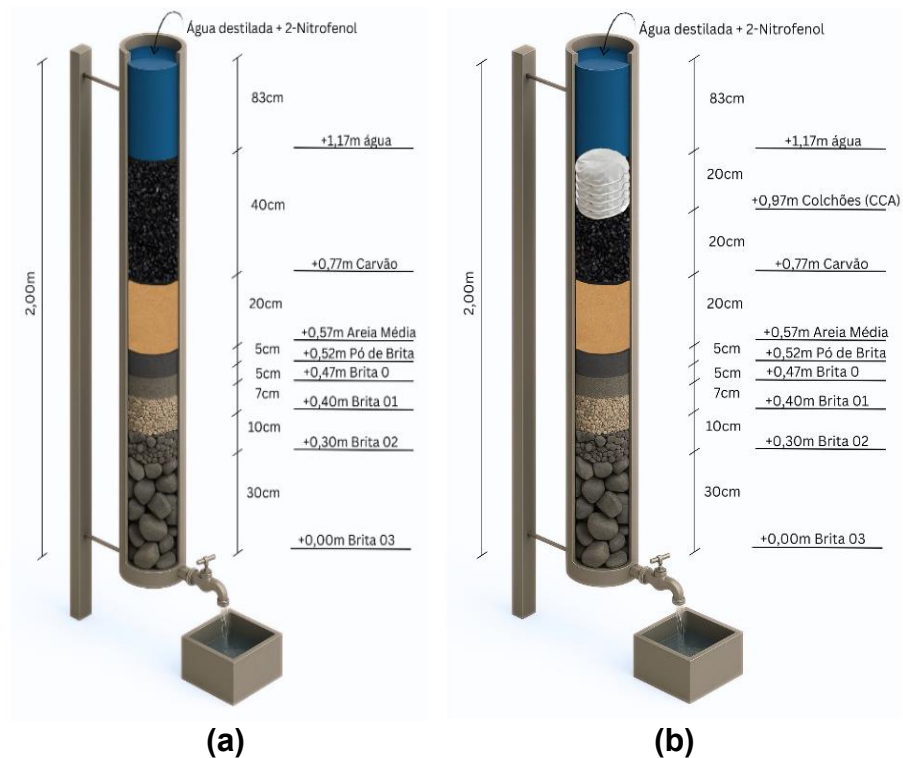
Após a obtenção da quantidade necessária de material para a composição das camadas filtrantes, procedeu-se à disposição ordenada dessas camadas no interior dos tubos. A organização foi realizada de forma decrescente, com os agregados de maior diâmetro posicionados na base do sistema. Para garantir a precisão das alturas, o processo de enchimento foi conduzido com o auxílio de uma trena. A cada camada inserida, verificava-se a distância entre o topo da respectiva camada e a extremidade superior do tubo, de forma a assegurar a conformidade com as alturas previamente estabelecidas.

Inicialmente, foram adicionadas as camadas de agregados graúdos no protótipo 1, iniciando-se pela brita 3, com espessura de 30 cm. Por meio da medição com a trena, verificou-se que a distância entre o topo da camada de brita e o topo do tubo era de 1,70 m, confirmando o valor projetado. Em seguida, foram dispostas, de forma sucessiva, as camadas de brita 2 (10 cm), brita 1 (7 cm) e brita 0 (5 cm), sempre com a devida verificação da altura. Após o posicionamento dos agregados graúdos, adicionaram-se as camadas de pó de brita, com espessura de 5 cm, e de

areia média, com espessura de 20 cm. Por fim, foi incorporada a camada de carvão ativado, com espessura de 40 cm.

A construção do protótipo 2 seguiu o mesmo procedimento, com a diferença de que a camada de carvão ativado teve espessura de 20 cm, complementada por uma camada de 20 cm CCA. Para compor essa camada, foram utilizados cinco colchões de 4 cm de espessura cada. A disposição das camadas e suas respectivas alturas para ambos os protótipos estudados encontra-se ilustrada na Figura 13, sendo que a Figura 13(a) exibe o protótipo 1 e a Figura 13(b) o protótipo 2. Após o assentamento adequado de todas as camadas filtrantes, deu-se início ao processo de filtração, com a adição de uma coluna de água.

Figura 19 - Disposição da granulometria nos protótipos: (a) 1 e (b) 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

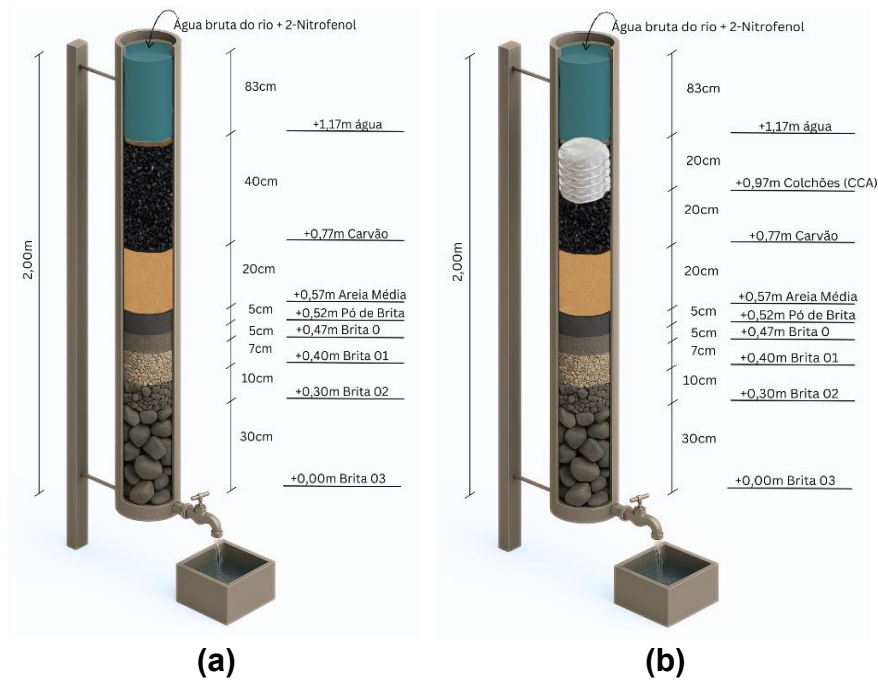
Os dois primeiros experimentos foram realizados com a solução composta por água destilada acrescida do micropoluinte 2-nitrofenol. Para cada fluxo de água descendente, estabeleceram-se intervalos de tempo específicos para a coleta de amostras, com o objetivo de monitorar o desempenho do sistema ao longo do tempo. Tal procedimento justifica-se pelo fato de que a filtração é um processo dinâmico, podendo haver redução gradual da taxa de filtração em função de fenômenos como a colmatação do meio filtrante.

Definiu-se, assim, o seguinte cronograma de coletas: a cada 1 minuto durante os primeiros 10 minutos; a cada 2 minutos nos 10 minutos subsequentes; a cada 3 minutos nos 10 minutos seguintes; e, por fim, a cada 5 minutos até o encerramento do fluxo. As amostras foram, portanto, coletadas nos seguintes tempos: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 23, 26, 29, 32, 35, 40, 45, 50 e 55 minutos ou até o interrompimento do fluxo.

Com o auxílio de um recipiente, foi despejado o volume de água no topo da coluna, e o cronômetro foi acionado quando ocorreu a saída da primeira gota de água pela base da estrutura e foram coletadas e separadas as amostras conforme os intervalos de tempos já citados.

Na semana seguinte, realizou-se a substituição de todo o material presente no interior do tubo, incluindo os colchões contendo CCA, com o objetivo de assegurar uma limpeza completa. Essa etapa teve como finalidade evitar possíveis interferências decorrentes da saturação da camada filtrante, da presença residual do micropolvente no material adsorvente, bem como da perda de eficácia da CCA, garantindo condições adequadas para a realização dos experimentos subsequentes. Os dois experimentos seguintes foram conduzidos de acordo com a solução de água coletada do Rio Ibirapuitã adicionada da molécula de 2-nitrofenol, seguindo os mesmos procedimentos adotados nos experimentos anteriores. A Figura 20 apresenta a configuração adotada e do sistema para o processo de filtração com água do rio, onde a Figura 20(a) representa o protótipo 1 e a Figura 20(b) representa o protótipo 2.

Figura 20 - Disposição da granulometria nos protótipos, com água do rio, onde: (a) Protótipo 1 e (b) Protótipo 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras obtidas nos quatro experimentos foram coletadas em tubos Falcon de 50 mL, sem a necessidade de determinação precisa de volume, uma vez que a análise por espectrofotometria na região do ultravioleta-visível (UV-Vis) requer apenas uma quantidade reduzida de material, cerca de 4 mL. Todas as amostras foram devidamente identificadas com as seguintes informações: tempo de coleta, data do ensaio e identificação do experimento correspondente. Após a coleta, as ampolas foram lacradas para evitar contato com o ar e armazenadas sob refrigeração, a fim de preservar suas características físico-químicas até o momento da análise. A Figura 21 exibe o processo de coleta das amostras.

Figura 21 - Coleta de amostras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência, procedeu-se à análise de cada conjunto de amostras por meio de espectrofotometria na região do ultravioleta-visível (UV-Vis), utilizando o equipamento específico disponível em laboratório.

3.4 Etapa 4: Espectrofotometria na região do Ultravioleta/Visível – UV/Vis

A espectrofotometria UV-Vis é uma técnica de caracterização de materiais bem estabelecida, a qual foi utilizada em diferentes etapas neste trabalho. A análise foi conduzida no Laboratório de Óptica, Micro e Nanofabricação de Dispositivos (GOMNDI), utilizando o espectrofotômetro UV-Vis (Bel Photonics) representado na Figura 22. A análise espectroscópica, abrangendo as regiões do espectro visível (VIS) e ultravioleta (UV), foi executada conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR 14910 (ABNT, 2002).

Figura 22 - Aparelho de espectrofotometria UV-VIS



Fonte: Elaborado pelo autor.

O espectrofotômetro utilizado operou com uma fonte luminosa acoplada a um monocromador, responsável pela separação da luz em diferentes comprimentos de onda, abrangendo o espectro de 190 nanômetros (UV) a 1100 nanômetros (infravermelho próximo). Principalmente, através da espectrofotometria, foi possível avaliar o comportamento das amostras quanto à transmissão da luz na faixa entre 190 nm e 550 nm, uma vez que, conforme a Lei de Lambert-Beer, a concentração de uma substância em solução apresenta relação direta com a quantidade de luz absorvida em faixas de comprimento de onda específicos. Por meio desse ensaio, foi possível caracterizar a molécula de 2-nitrofenol, a água do rio, e as amostras de solução após a passagem pelo sistema filtrante.

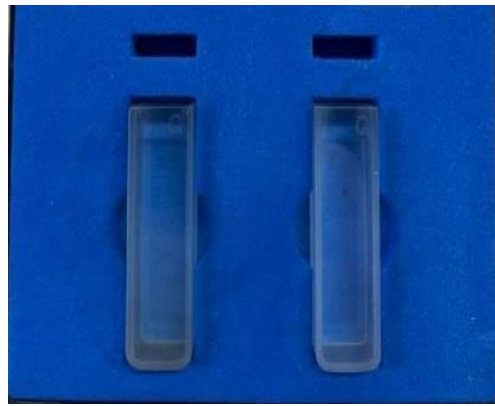
Com o objetivo de viabilizar as análises, as soluções obtidas em diferentes tempos foram submetidas a um processo de filtração através de um filtro inerte acoplado em uma seringa, conforme mostrado na Figura 23(a). Esse procedimento de filtração teve como objetivo remover partículas de areia e eventualmente de CCA, presentes nas amostras que poderiam afetar a interação da luz com a amostra na análise subsequente. O sobrenadante, foi colocado dentro de uma cubeta de quartzo (Figura 23(b)) contendo aproximadamente 4 mL e levado até o interior do aparelho, onde foi analisado por espectrofotometria.

Figura 23 - (a) Filtro inerte acoplado à seringa; (b) Cubetas de quartzo



(a)

Fonte: Elaborado pelo autor.



(b)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, serão listados os resultados que foram obtidos a partir das análises descritas anteriormente. Estes resultados serão explorados e examinados na sequência, abordando as descobertas e verificando se as respostas atendem as questões e objetivos propostos do trabalho.

4.1 Caracterização dos materiais do sistema de filtração

Como resultado do processo de caracterização e separação granulométrica dos agregados, descrito no tópico 3.1, foram obtidas diferentes granulometrias correspondentes à composição do sistema filtrante. A Figura 24 exibe visualmente estas frações de agregados utilizadas, devidamente separadas de acordo com os critérios estabelecidos por meio do peneiramento.

Assim, a seleção dos agregados possibilitou a construção de um sistema experimental com características controladas e compatíveis com as estruturas utilizadas nas estações de tratamento de água, o que contribui significativamente para a confiabilidade dos ensaios realizados nas etapas subsequentes.

Figura 24 - Granulometrias separadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, são apresentados os resultados de caracterização obtidos para os materiais adsorventes: a CCA e o carvão antracito. A Figura 25 exibe amostras dos materiais adsorventes utilizados.

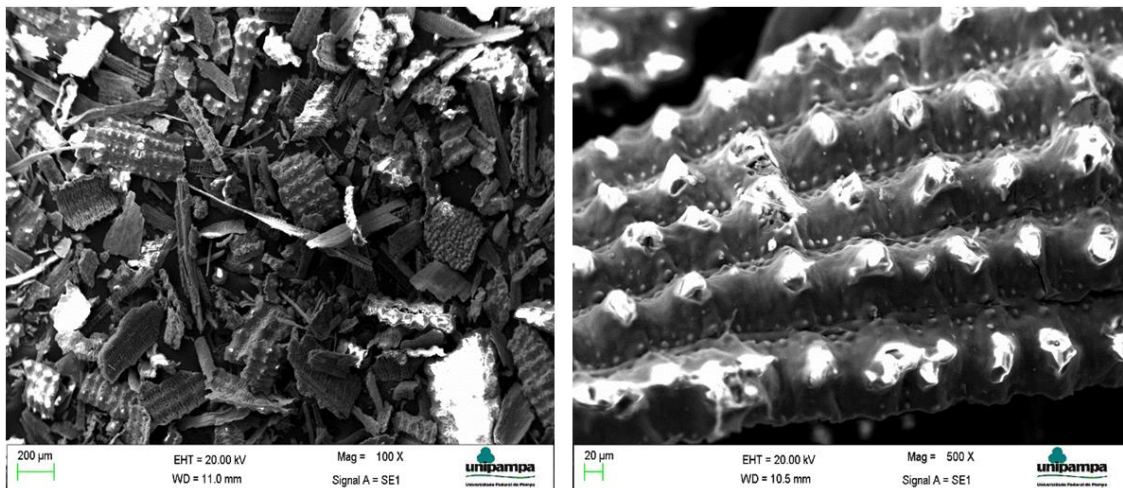
Figura 25 - Amostras dos materiais adsorventes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 26, a imagem de MEV da amostra CCA (com aumento de até 1000x) revela uma morfologia caracterizada por estruturas rígidas e alongada, atribuída à presença de resíduos derivados da celulose. Esses elementos estruturais favorecem o aumento da área superficial do material, um aspecto desejável em aplicações de adsorção. Essa característica é consistente com estudos recentes, como os de Zhang *et al.* (2023) e Kumar *et al.* (2022), que destacam o papel dos resíduos lignocelulósicos na formação de superfícies porosas em materiais obtidos a partir de cinzas agrícolas.

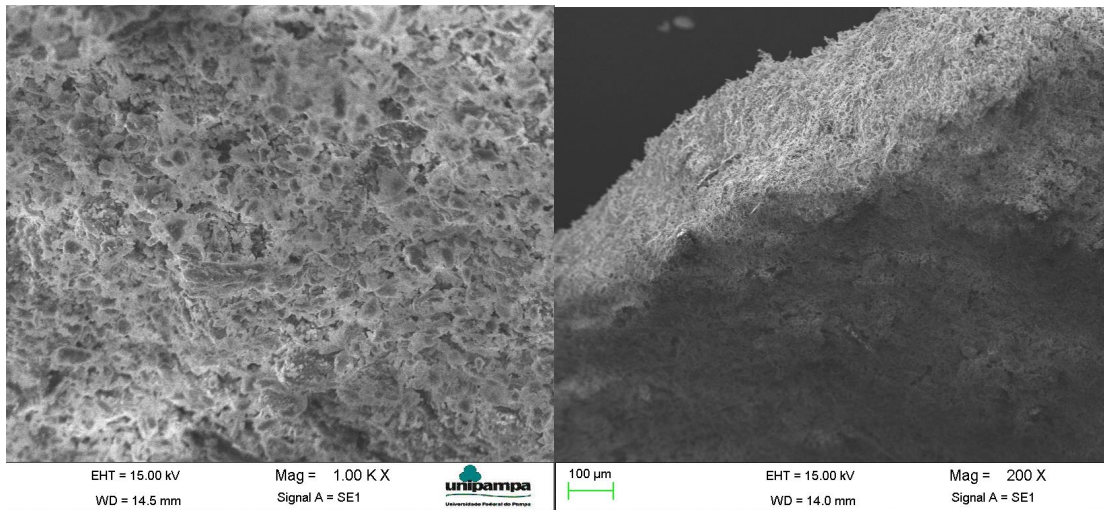
Figura 26 - MEV da CCA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já na imagem do carvão, conforme apresentado na Figura 27 é possível perceber uma estrutura mais homogênea, do tipo floculada e muito porosa, que facilita fortemente a interação com a solução e o processo de adsorção como um todo. Este tipo de estrutura é mais próxima dos materiais ricos em carvão e extremamente porosos, como os carvões ativados (Song, 2020).

Figura 27 - MEV do carvão



Fonte: Elaborado pelo autor.

A composição química da CCA foi determinada por meio de teor de CHN (UFRGS) e Fluorescência de Raios-X, conforme apresentado na Tabela 2. A CCA apresentou um teor de sílica de 84,6%. Embora esse valor seja inferior ao observado em cinzas modificadas com outros tratamentos (Popova *et al.*, 2024; Daffalla *et al.*, 2020), resultando em menor pureza de sílica, continua sendo um valor considerável favorecendo a adsorção de poluentes. De fato, segundo Kim *et al.* (2008), Madu *et al.* (2021) e Li *et al.* (2023), a qualidade e eficácia da CCA como material adsorvente estão diretamente relacionadas à pureza da sílica.

A CCA apresentou também concentrações de óxidos de elementos alcalinos e alcalino-terrosos, como K_2O , MgO e CaO . Esses elementos podem exercer um papel importante na eficiência de adsorção, reduzindo a polaridade da superfície. Esse efeito favorece a adsorção de poluentes orgânicos, especialmente aqueles com estruturas aromáticas como o 2-nitrofenol (Tang, 2022).

Tabela 7 - Composição química da CCA e do carvão antracito, em % em massa

Material	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	C*
CCA	84,6	0,03	0,3	1,4	0,4	0,02	2,9	0,05	11,4
Material	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	C*
Carvão	5,38	0,27	0,29	2,31	0,95	0,56	0,20	0,06	89,1

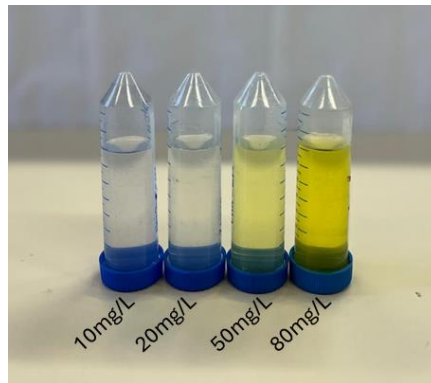
Fonte: Elaborado pelo autor.

*Determinado por CHN.

4.2 Caracterização da molécula 2-nitrofenol

Em um primeiro momento, diferentes concentrações de 2-nitrofenol foram preparadas para construir a curva de calibração, uma equação matemática que relaciona absorvância medida à concentração do analito, com base na Lei de Lambert-Beer. A curva de calibração foi elaborada a partir de soluções com concentrações conhecidas preparadas em laboratório (10 mg/L, 20 mg/L, 50 mg/L e 80 mg/L), conforme exposto na Figura 28.

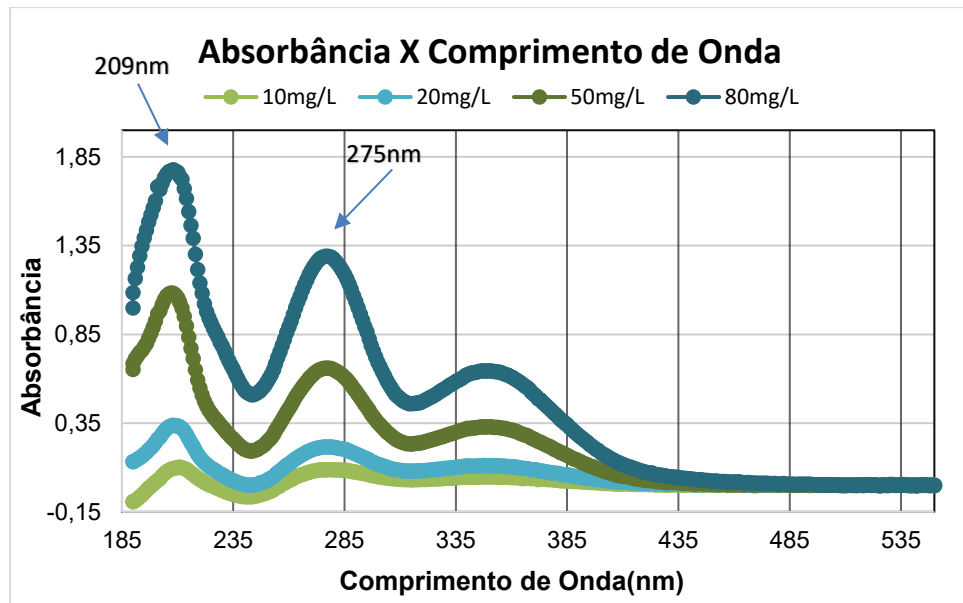
Figura 28 - Soluções concentradas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada concentração, foram medidas as respectivas absorvâncias ao longo dos comprimentos de onda, de modo a identificar os picos de absorção característicos da molécula. Os espectros são apresentados na Figura 29: como é possível determinar, existem pelo menos três picos característicos desta molécula, que diminuem de intensidade com a diminuição da concentração da molécula em solução. O pico em 209 nm, mais intenso e de fácil identificação foi escolhido para construir a curva de calibração, conforme o gráfico da Figura 30.

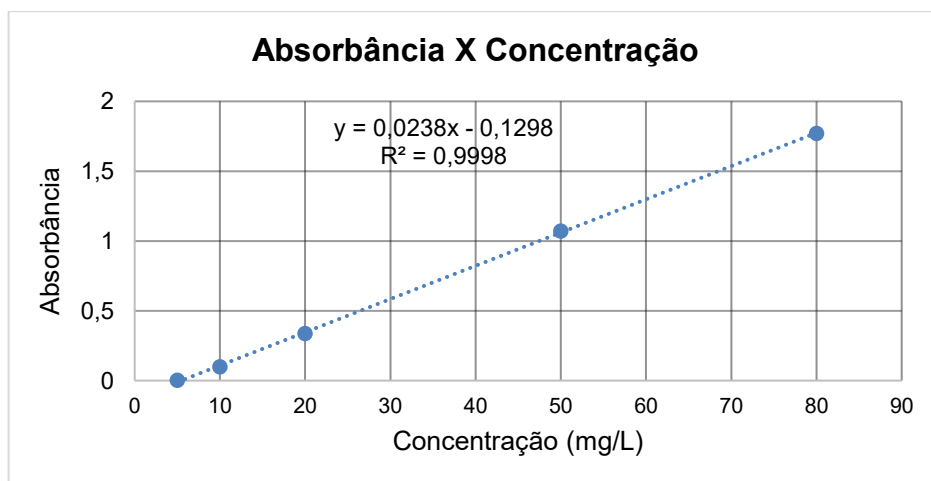
Figura 29 - Espectros de absorção do 2-nitrofenol



Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre a concentração do 2-nitrofenol e a absorbância UV-Vis foi determinada pela equação da reta igual a $y = 0,0238x - 0,01298$.

Figura 30 - Curva de calibração



Fonte: Elaborado pelo autor.

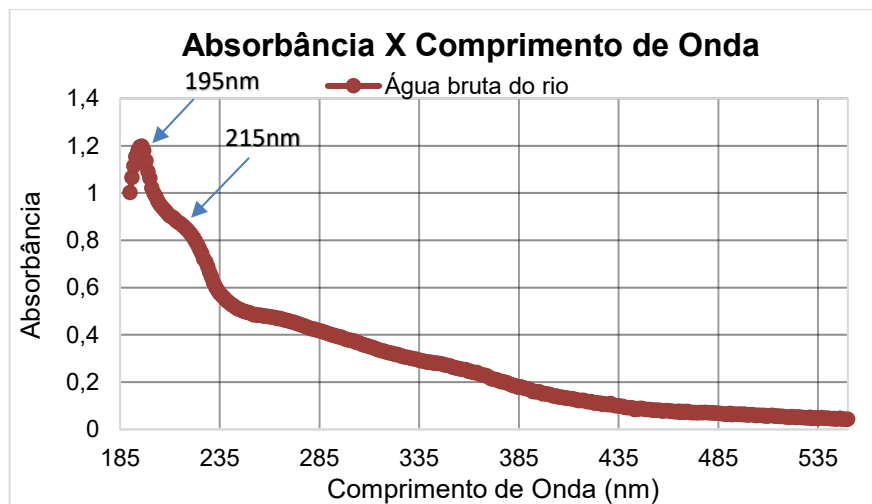
4.3 Caracterização da água do rio

A caracterização da água do rio antes de sua passagem pelo sistema filtrante foi também analisada de forma semelhante. Inicialmente, por meio da análise de UV-Vis, foi possível determinar a absorbância da amostra bruta, servindo como

parâmetro inicial (linha de base) para comparação com os resultados obtidos após a filtração.

Esse procedimento permite verificar a presença de substâncias que possam interferir nas leituras posteriores, garantindo maior confiabilidade aos dados experimentais. Além disso, a quantificação da absorvância inicial possibilita o cálculo da eficiência de remoção do contaminante adicionado, a partir da variação da absorvância entre a amostra de entrada e saída do sistema filtrante. O gráfico da Figura 31 exibe o espectro encontrado para a água bruta do rio.

Figura 31 - Espectro da água do rio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, foi possível detectar picos de absorção em 195 nm e 215 nm, indicativo de presença de materiais orgânicos e poluentes nas águas. Em particular, a presença de compostos como nitrato, nitrito e matéria orgânica dissolvida (MOD) em águas naturais é frequentemente monitorada utilizando espectroscopia UV-Vis, devido às suas características de absorção na faixa de 185 a 215 nm. O nitrato (NO_3^-) apresenta um pico de absorção característico próximo a 200–210 nm, enquanto o nitrito (NO_2^-) mostra máxima absorção entre 200 e 205 nm (Silva *et al.*, 2024; Dong *et al.*, 2024). Já a MOD, responsável por grande parte do carbono orgânico dissolvido (COD), contribui com uma absorção difusa e significativa em todo o espectro de 190 a 250 nm (Huang *et al.*, 2024).

Em particular, nitratos e nitritos em águas naturais são geralmente oriundos de processos de decomposição da matéria orgânica, escoamento agrícola com fertilizantes nitrogenados e descargas de efluentes domésticos e industriais,

representando indicadores importantes de contaminação antrópica (Camargo *et al.*, 2021). Realizada a caracterização da água bruta através do UV-vis, também foram obtidos os resultados da análise química feita com o equipamento Multiparâmetro, que forneceu os dados de condutividade, turbidez e pH conforme mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros avaliados da água bruta

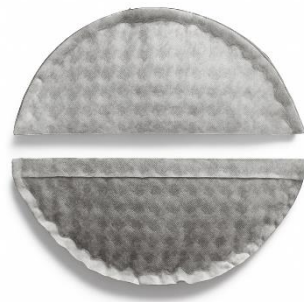
Parâmetro avaliado	Unidade	Valor
Condutividade Elétrica	$\mu\text{S/cm}$	273,7
Turbidez	uT	1,54
pH	-	6,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Montagem das colunas e filtração

Inicialmente, os colchões foram confeccionados a partir de duas semicircunferências de mantas de tecido não tecido (TNT) do tipo multiuso, compostas por fibras de viscose e poliéster, contendo CCA, conforme exposto na Figura 32(a). A estrutura porosa do TNT permite o livre escoamento da água, ao passo que evita a dispersão do material particulado, contribuindo para a estabilidade e eficiência do sistema filtrante. Além disso, para garantir a integridade do material ao longo do tubo, foi aplicado um acabamento em tecido de algodão. O resultado final está apresentado na Figura 32(b), sendo que cada colchão mediu aproximadamente 4 cm de altura, 15 cm de diâmetro e peso médio de 165 g.

Figura 32 - (a) CCA envolvida em tecido não tecido; (b) Colchões de CCA - resultado



(a)

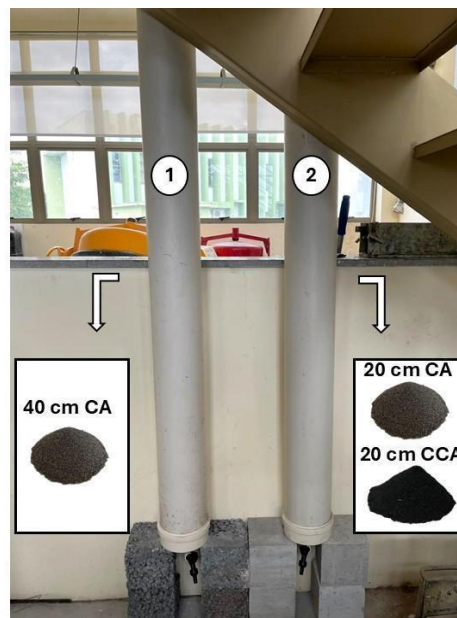


(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os colchões confeccionados, a coluna devidamente montada e as camadas de filtração estabelecidas conforme os procedimentos descritos no item 3.3, foi possível realizar o processo de filtração. A Figura 33 apresenta as colunas dispostas verticalmente no laboratório. Ressalta-se que a imagem não permite a visualização da altura total das colunas, uma vez que parte da estrutura se encontrava apoiada na área localizada atrás da escada. Também, a disposição das camadas não pôde ser observada externamente, devido à opacidade do tubo de PVC; por esse motivo, foi elaborado um esboço da camada adsorvente presente em cada protótipo.

Figura 33 - Resultado da montagem dos protótipos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

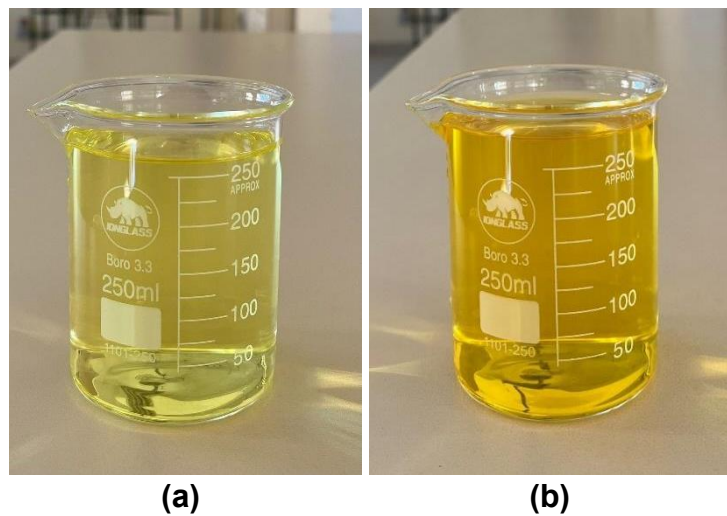
Dessa forma, foi dado início à fase experimental principal do estudo: a filtração. Os dois primeiros experimentos foram realizados utilizando a solução com água destilada cuja composição e procedimentos são descritos no tópico 3.2. A Figura 34(a) apresenta uma porção representativa da solução transferida para um béquer, com a finalidade de destacar visualmente sua cor característica.

Após o acréscimo da carga de água e o início do escoamento pela torneira na base do sistema, iniciou-se a contagem do tempo por meio de um cronômetro. No protótipo 1, a operação perdurou por aproximadamente 45 minutos até a completa interrupção do fluxo e o protótipo 2 apresentou um tempo de escoamento contínuo de cerca de 50 minutos até a cessação total do fluxo.

Nos experimentos subsequentes, foi utilizada a solução com água bruta do rio, conforme a porção representativa exibida na Figura 34(b), cuja composição é descrita no tópico 3.2.

Nesse caso, o protótipo 1 permaneceu em operação por cerca de 50 minutos até a completa obstrução do fluxo, enquanto o protótipo 2 apresentou um tempo de escoamento contínuo de aproximadamente 75 minutos, até a sua interrupção total.

Figura 34 - (a) Porção representativa da solução de água destilada com 2-nitrofenol e (b) Água bruta com 2-nitrofenol



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, as amostras provenientes dos quatro processos de filtração foram submetidas à análise por espectrofotometria UV-Vis, e seus resultados encontram-se descritos no item a seguir.

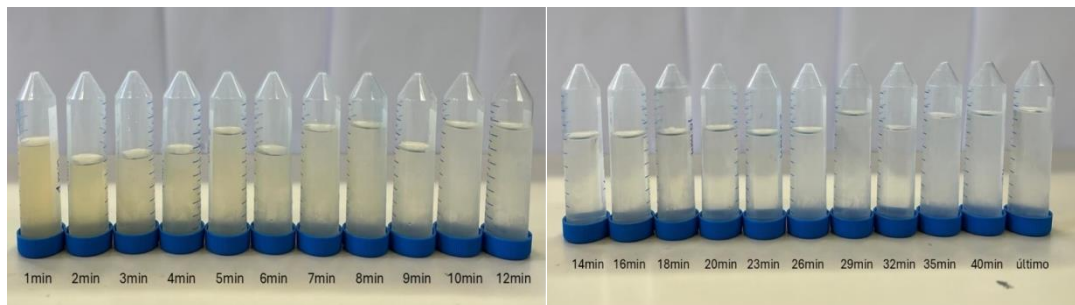
4.5 Amostras Filtradas

Neste tópico são apresentadas as análises e considerações referentes aos conjuntos de amostras de água filtradas nos dois protótipos desenvolvidos. As variações das concentrações do micropoluinte 2-nitrofenol ao longo do tempo foram avaliadas com base na porcentagem de remoção, permitindo a comparação do desempenho de cada sistema. A partir dos resultados obtidos, são realizadas discussões que buscam evidenciar a eficácia dos materiais filtrantes utilizados, bem como as possíveis vantagens do uso da CCA como alternativa complementar ao carvão antracito.

4.5.1 Caso 01- Água destilada

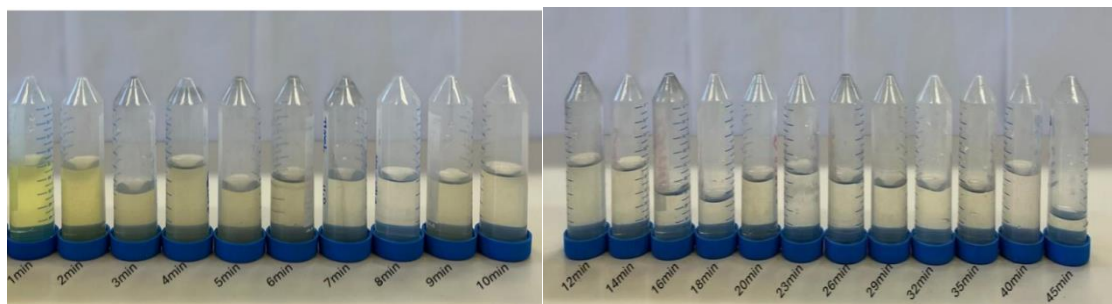
Após o processo de filtração da solução com água destilada, utilizando carvão antracito como material adsorvente, foram coletadas as amostras apresentadas na Figura 35. Posteriormente, obtiveram-se as amostras filtradas com a combinação de carvão antracito e CCA, conforme exposto na Figura 36.

Figura 35 - Amostras de água destilada filtradas com carvão



Fonte: Elaborado pelo autor.

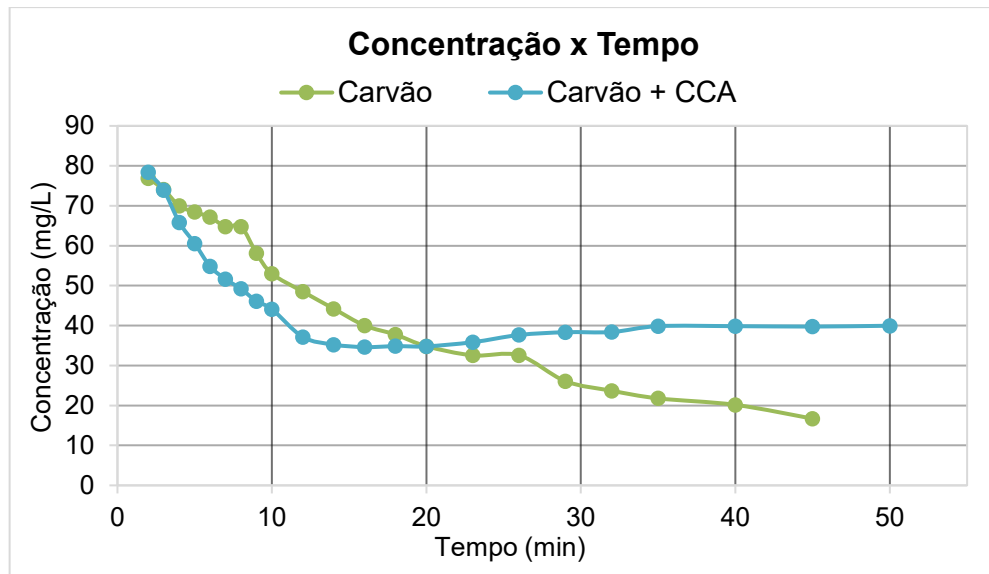
Figura 36 - Amostras de água destilada filtradas com carvão e CCA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as amostras foram submetidas à análise espectrofotométrica, visando aferir a eficiência do processo de remoção do micropoluentes. Assim, foi possível construir o gráfico que correlaciona a concentração da substância aos respectivos tempos de coleta, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37 - Avaliação do desempenho: Carvão e Carvão + CCA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, observa-se uma redução significativa na concentração do micropoluinte ao longo do tempo em ambos os casos avaliados.

O carvão antracito apresentou elevada capacidade de remoção do contaminante, sendo que a concentração inicial de 2-nitrofenol, em torno de 80 mg/L, foi reduzida de forma contínua até aproximadamente 17 mg/L após 45 minutos de filtração. Esse comportamento corresponde a uma remoção progressiva e eficiente de cerca de 63 mg/L do composto. Tais resultados evidenciam que, em condições controladas e na ausência de interferência de outros componentes, o carvão apresenta expressiva capacidade de adsorção para esse micropoluinte.

Quanto ao sistema filtrante com substituição parcial do carvão antracito por CCA, também foi observada uma remoção expressiva do 2-nitrofenol. Especificamente, essa combinação apresentou desempenho superior ao carvão puro nos primeiros minutos de filtração, evidenciando uma remoção inicial mais acentuada. Entretanto, a eficiência do processo se estabilizou, permanecendo constante até o término do experimento. Considerando uma concentração inicial de 80 mg/L, obteve-se uma concentração final de aproximadamente 39 mg/L, o que corresponde à remoção de cerca de 41 mg/L do micropoluinte.

De um ponto de vista de eficiência, a coluna composta por carvão e CCA apresentou capacidade de remoção de 51% da substância, enquanto a coluna contendo apenas carvão alcançou 79% de eficiência de remoção.

Contudo, a Tabela 9 apresenta os dados numéricos referentes à concentração de 2-nitrofenol ao longo do tempo nas amostras filtradas com carvão antracito e com a combinação de carvão e CCA, bem como o percentual de absorvância do protótipo contendo CCA em comparação ao protótipo composto exclusivamente por carvão. Dessa forma, é possível visualizar o desempenho percentual do material alternativo (CCA) ao longo do período analisado, viabilizando a comparação da sua eficácia.

Tabela 9 - Percentagem de absorção do carvão + CCA em relação ao carvão

Tempo (min)	Carvão (mg/L)	Carvão + CCA (mg/L)	Absorção (%)
2	76,91	78,37	-2%
3	74,05	73,89	0%
4	69,97	65,85	6%
5	68,44	60,56	13%
6	67,15	54,82	22%
7	64,79	51,60	26%
8	64,79	49,20	32%
9	58,09	46,09	26%
10	52,99	44,13	20%
12	48,51	37,16	31%
14	44,22	35,24	25%
16	40,03	34,62	16%
18	37,74	34,85	8%
20	34,84	34,81	0%
23	32,55	35,85	-9%
26	32,55	37,65	-14%
29	26,09	38,35	-32%
32	23,69	38,39	-38%
35	21,78	39,86	-45%
40	20,15	39,86	-49%
45	16,70	39,76	-58%
50	-	39,97	-100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

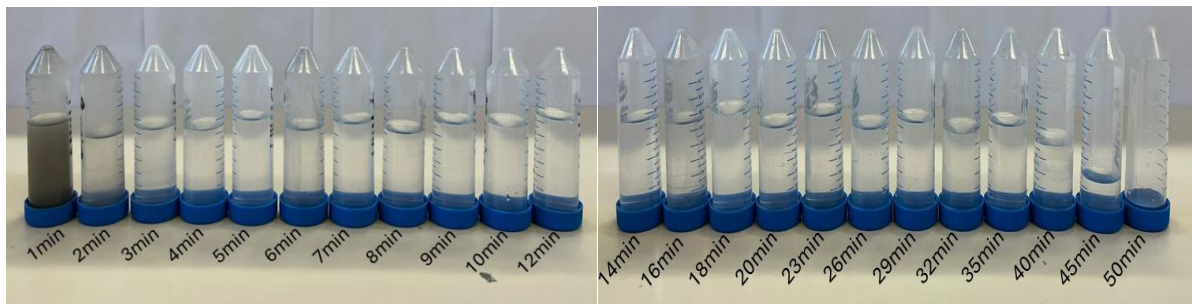
Observa-se que, no oitavo minuto de filtração, o Protótipo 2 apresentou uma eficiência de remoção do 2-nitrofenol aproximadamente 32% superior à obtida pelo Protótipo 1, que utilizava apenas carvão antracito. Esse resultado indica que, embora a eficiência global do carvão antracito tenha sido superior ao final do processo, a adição de CCA favoreceu uma remoção mais rápida nos momentos iniciais da filtração. Apenas após 20 minutos de operação foi possível identificar um comportamento de estabilização, seguido por um aumento na concentração de 2-

nitrofenol no efluente do Protótipo 2. Tal fenômeno pode estar associado à saturação precoce da CCA, que, apesar de apresentar desempenho inicial superior, apresentou capacidade limitada de adsorção em longo prazo.

4.5.2 Caso 02- Água bruta

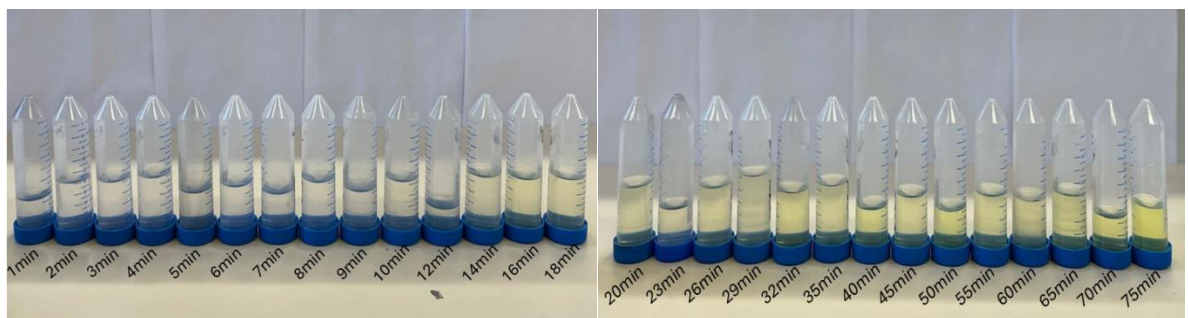
A seguir, apresentam-se os resultados referentes às amostras de água bruta do rio, obtidas após o processo de filtração realizado em ambos os protótipos. A Figura 38 corresponde às amostras filtradas exclusivamente com carvão antracito, enquanto a Figura 39 remete às amostras submetidas à filtração com a combinação de carvão antracito e CCA.

Figura 38 - Amostras de água bruta filtradas com carvão



Fonte: Elaborado pelo autor.

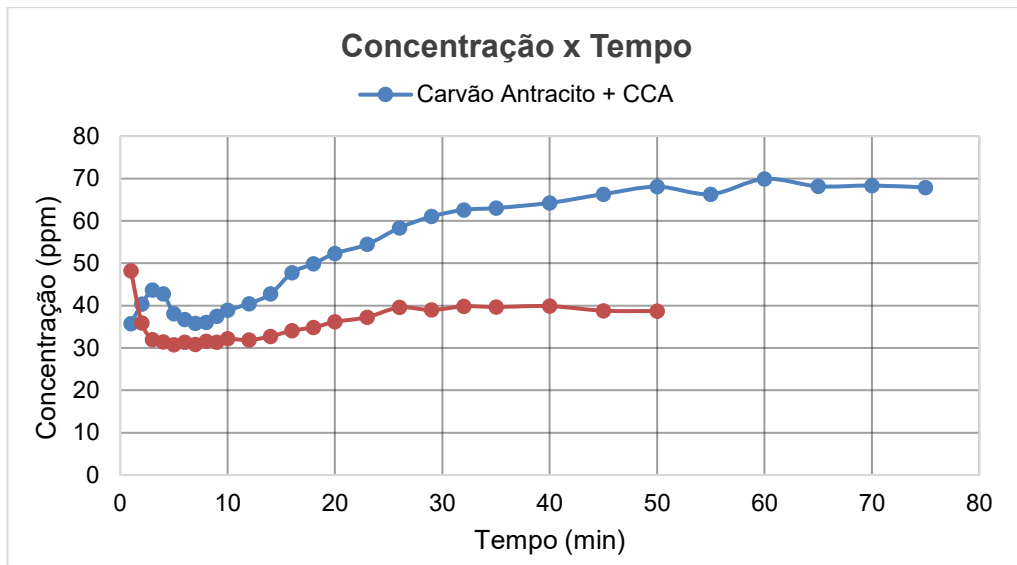
Figura 39 - Amostras de água bruta filtradas com carvão + CCA



Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo semelhante ao procedimento anteriormente realizado, as amostras foram analisadas por espectrofotometria, possibilitando a elaboração do gráfico que relaciona a concentração da substância ao tempo de coleta, conforme apresentado na Figura 40. Primeiramente foi feito o monitoramento do pico 209.

Figura 40 - Avaliação do desempenho: Água bruta no pico 209nm



Fonte: Elaborado pelo autor

Em contraste, no ensaio utilizando água de rio, observou-se um perfil de adsorção significativamente diferente.

Inicialmente, o carvão antracito demonstrou elevada capacidade de remoção do contaminante, partindo de uma concentração inicial de 2-nitrofenol de aproximadamente 48 mg/L na primeira amostra. Essa concentração foi progressivamente reduzida até cerca de 5 minutos, intervalo em que se verificou o maior índice de remoção do composto. Entretanto, ao longo do tempo, observou-se um aumento gradativo da concentração, comportamento que diferiu do perfil observado nas amostras com água destilada, que apresentaram tendência de redução contínua. Ao final do experimento, após 50 minutos de filtração, a concentração atingiu 38 mg/L, resultando em uma remoção final de 52%.

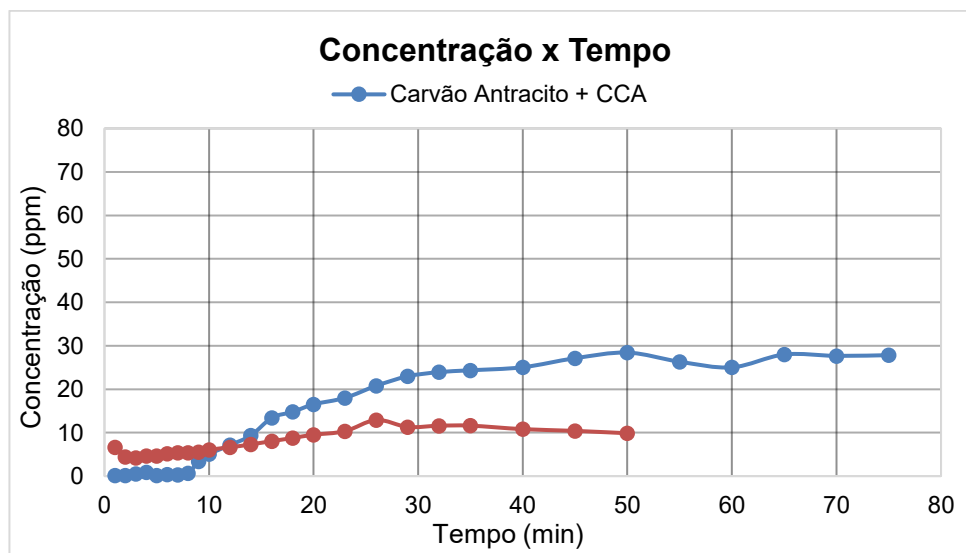
Por sua vez, as amostras filtradas pelo sistema contendo carvão antracito e CCA apresentaram uma redução inicial na concentração de 80 mg/L para aproximadamente 35 mg/L logo após o início da filtração. Entretanto, com a continuidade do processo, registrou-se um aumento progressivo da concentração no efluente, que atingiu um valor final mais elevado de 67 mg/L. Inicialmente, o sistema apresentou uma remoção de 56%, finalizando o processo com apenas 16% de eficiência. Esse comportamento sugere uma possível saturação dos sítios de adsorção e, possivelmente, efeitos de competição e deslocamento promovidos por outros constituintes presentes na matriz da água natural. A matéria orgânica dissolvida (MOD), comumente representada pelo carbono orgânico dissolvido

(COD), é amplamente reconhecida como um fator que reduz a eficiência de adsorventes devido à competição por sítios ativos (Dong *et al.*, 2024; Huang *et al.*, 2024). Além disso, nitrato e nitrito, presentes em águas naturais como resultado de atividades agrícolas e descargas de efluentes (Camargo *et al.*, 2021), podem contribuir com cargas iônicas adicionais que influenciam o equilíbrio de adsorção.

Outro fator a ser considerado é o possível efeito de deslocamento. A literatura descreve que, em sistemas com presença de matéria orgânica natural, moléculas previamente adsorvidas (como o 2-nitrofenol) podem ser deslocadas por compostos de maior afinidade (Nouri & Haghseresht, 2004). Tal mecanismo pode explicar o aumento da concentração de 2-nitrofenol no efluente após a redução inicial.

Se o monitoramento da concentração da substância for feita em 209 nm, uma faixa de comprimento de onda onde tanto nitrato quanto a MOD apresentam também significativa absorção, há a possibilidade de superestimar a concentração (Silva *et al.*, 2024; Dong *et al.*, 2024). Assim, para evitar possíveis interferências analíticas, foi decidido monitorar o 2-nitrofenol em comprimentos de onda maiores, como 275 nm, mais específico para esta molécula; assim, foi elaborada a Figura 41.

Figura 41 - Avaliação do desempenho: Água bruta no pico 275nm



Fonte: Elaborado pelo autor.

O perfil de detecção manteve o comportamento observado anteriormente: inicialmente, a concentração de 2-nitrofenol nas amostras filtradas com carvão antracito foi reduzida de 80 mg/L para aproximadamente 5 mg/L no primeiro minuto, seguida de um leve aumento até se estabilizar em torno de 10 mg/L após 50 minutos, consolidando uma taxa de remoção de 87%. Por sua vez, o sistema

contendo CCA apresentou concentrações muito baixas nos primeiros minutos, próximas de zero, e, posteriormente, um aumento gradual que se estabilizou em aproximadamente 27 mg/L após 75 minutos. Ao final do experimento, foi registrada uma remoção de 65%. Apesar desse aumento progressivo ao longo do tempo, observou-se uma eficácia de remoção equivalente ou superior à verificada na água filtrada sem tratamento, que apresentou taxa de remoção de 52%.

Com base nesses resultados, podem-se confirmar duas situações: em primeiro lugar, que a presença de matéria orgânica e outros poluentes presentes nas águas do rio interfere de forma significativa na adsorção do contaminante em estudo, sendo necessário maior cuidado com a remoção prévia dessas substâncias nos processos realizados nas ETAs. Em segundo lugar, baseado na análise efetuada monitorando a absorção em 209nm, é possível afirmar que ambos os protótipos demonstraram remover também estes outros contaminantes oriundos da água bruta do rio.

Adicionalmente, a Tabela 10 apresenta os dados de absorbância nos picos de 209 e 275 nm, assim como o respectivo percentual de absorbância da coluna contendo CCA em relação à coluna composta exclusivamente por carvão antracito.

Observa-se que o sistema com carvão e CCA apresentou maior eficiência de remoção em comparação ao carvão durante os primeiros 10 minutos; contudo, aos 12 minutos, já se verificava uma redução de cerca de 8% na eficácia em comparação ao sistema contendo apenas carvão.

Tabela 10 - Percentagem de absorção do carvão + CCA em relação ao carvão: Pico 275nm

Tempo (min)	Carvão (ppm)	Carvão +CCA (ppm)	Abs. (%)
1	6,64	0,14	98%
2	4,41	0,16	96%
3	4,20	0,55	87%
4	4,63	0,88	81%
5	4,65	0,18	96%
6	5,13	0,41	92%
7	5,40	0,30	94%
8	5,36	0,63	88%
9	5,52	3,37	39%
10	6,07	5,06	17%
12	6,63	7,14	-8%

14	7,30	9,35	-28%
16	8,05	13,40	-66%
18	8,77	14,80	-69%
20	9,53	16,51	-73%
23	10,34	18,00	-74%
26	12,93	20,79	-61%
29	11,31	22,97	-103%
32	11,60	23,93	-106%
35	11,61	24,35	-110%
40	10,81	25,05	-132%
45	10,41	27,13	-161%
50	9,87	28,43	-188%
55	-	26,33	-
60	-	25,03	-
65	-	27,98	-
70	-	27,67	-
75	-	27,84	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, foram analisados os parâmetros de turbidez, pH e condutividade elétrica após cada ensaio realizado com a amostra proveniente do rio. As análises foram realizadas em triplicata com o objetivo de garantir a confiabilidade, a precisão e a reprodutibilidade dos resultados, possibilitando a avaliação da variabilidade e a obtenção de dados estatisticamente consistentes. As análises foram realizadas para os minutos 6, 15 e 35, de forma a contemplar amostras correspondentes aos momentos iniciais, intermediários e finais do processo de filtração.

A Tabela 11 mostra os resultados obtidos às amostras filtradas somente com carvão, enquanto a Tabela 12 mostra os dados das análises das amostras filtradas com carvão e CCA.

Tabela 11 - Resultados da triplicata filtrada com carvão

Parâmetro avaliado	06 min	16 min	35 min
Condutividade Elétrica (uS/cm)	1729 ± 4,00	955 ± 3,22	710,4 ± 2,00
Turbidez (uT)	0,92 ± 0,02	0,06 ± 0,02	0,92 ± 0,02
pH	6,0 ± 0,00	6,0 ± 0,00	6,0 ± 0,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 - Resultados da triplicata filtrada com carvão + CCA

Parâmetro avaliado	06 min	16 min	35 min
Condutividade Elétrica (uS/cm)	769,6 ± 2,6	438,9 ± 1,01	347,4 ± 1,16
Turbidez (uT)	1,86 ± 0,01	0,09 ± 0,01	1,27 ± 0,01
pH	6,0 ± 0,00	5,5 ± 0,00	5,5 ± 0,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conclui-se que, em ambas as filtragens, as primeiras amostras apresentaram elevados valores de condutividade elétrica, possivelmente em razão da liberação inicial de sais e íons solúveis presentes nos materiais adsorventes, em especial na CCA. Com a continuidade do processo de filtração, esses compostos tenderam a ser progressivamente lixiviados, resultando na diminuição gradual da condutividade ao longo do tempo. Ao final do processo, não se observou melhora significativa na condutividade elétrica da água em comparação à amostra de água bruta.

Em relação à turbidez, aos 6 minutos, apenas a amostra filtrada exclusivamente carvão apresentou valores adequados (<1,0 uT), enquanto a amostra de carvão com cinza excedeu o limite estabelecido. Contudo, aos 16 minutos, ambas as amostras apresentaram valores muito baixos e dentro dos padrões aceitáveis para potabilidade, consolidando uma melhora significativa em relação à amostra bruta. Entretanto, aos 35 minutos, na amostra filtrada com carvão antracito e CCA, foi verificado o extrapolamento do limite permitido de turbidez, resultado que evidencia a cor mais amarelada observada visualmente nas amostras, possivelmente associada ao fenômeno de colmatação e saturação do leito filtrante, conforme já discutido. Os parâmetros de turbidez da amostra coletada no protótipo composto exclusivamente por carvão antracito também apresentaram elevação nesse intervalo, porém mantiveram-se aceitáveis, permanecendo abaixo de 1,0 uT.

Em relação ao pH, em ambos os casos não foi possível constatar uma tendência clara de melhora ou piora, uma vez que o aparelho apresentou amplas variações nos valores a cada medição. De modo geral, em ambos os sistemas, o pH manteve-se relativamente estável ao longo dos ensaios, e não sofreu alterações em respeito à água bruta do rio.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentado um estudo que demonstrou a viabilidade do uso da CCA como material adsorvente, bem como sua caracterização, visando à possível aplicação na estrutura de filtração das ETAs, em razão de algumas propriedades relevantes que este material apresenta. Vale ressaltar que a CCA é amplamente disponível na Região Sul do Brasil, especialmente na Fronteira Oeste, local onde esta pesquisa foi desenvolvida, e atualmente ainda carece de uma destinação adequada, o que impacta negativamente o meio ambiente. A utilização desse resíduo mostra-se promissora não apenas para mitigar impactos ambientais locais, mas também para gerar benefícios econômicos, ao possibilitar a substituição parcial do carvão antracito, material de custo mais elevado.

Os experimentos demonstraram que o carvão antracito apresentou maior eficiência global de remoção ao longo do tempo, resultado esperado, considerando que este já é um material consolidado e amplamente empregado em processos de adsorção nas ETAs. Por outro lado, a CCA proporcionou uma redução inicial mais intensa da concentração do contaminante, seguida por uma tendência de saturação precoce, indicando limitação quanto à estabilidade do desempenho ao longo do tempo de filtração.

A avaliação dos espectros UV-Vis evidenciou a eficácia dos materiais adsorventes, apresentando taxas de remoção do micropoluinte, ao final do processo com água destilada, de 79% para o sistema contendo apenas carvão e 51% para o sistema composto pela combinação de carvão e CCA. Nas amostras de água bruta proveniente do principal manancial da cidade, as taxas de filtração no pico de monitoramento em 209 nm foram mais baixas, possivelmente em decorrência da interferência de nitratos e matéria orgânica dissolvida (MOD), que também apresentam absorção significativa nessa faixa de comprimento de onda, podendo superestimar a concentração de 2-nitrofenol. O monitoramento realizado no pico de 275 nm, específico para a molécula em estudo, apresentou resultados mais representativos da eficiência real de remoção, com taxas de 87% para o carvão antracito e 52% para o sistema combinado.

As taxas de remoção relativamente próximas, com variação de 8% para o carvão e apenas 1% para o conjunto carvão e CCA, evidenciam a boa reprodutibilidade e consistência dos ensaios realizados.

Ainda, considerando que a concentração inicial de 80 mg/L utilizada nos experimentos é artificialmente elevada e superior aos níveis normalmente encontrados em ambientes naturais, observa-se que ambos os sistemas apresentaram desempenho satisfatório na remoção do contaminante. No entanto, a alta concentração do micropoluente pode ter contribuído para acelerar a saturação e a colmatação da camada adsorvente, limitando a eficiência do sistema contendo CCA ao longo do tempo.

No que se refere às análises físico-químicas realizadas em triplicata, os valores de condutividade elétrica apresentaram tendência de redução com o avanço do tempo de filtração. Entretanto, não se observou melhora significativa em comparação à condutividade da água bruta. Em contrapartida, os índices de turbidez evidenciaram uma redução expressiva durante a etapa intermediária do processo, atingindo 0,06 uT no sistema composto por carvão antracito e CCA e 0,09 uT no sistema contendo apenas carvão, em relação ao valor inicial de 1,54 uT verificado na amostra de água bruta. Ressalta-se que a maior redução percentual de turbidez (96,10%) foi registrada no protótipo com CCA aos 16 minutos.

Nesse contexto, é possível inferir que CCA utilizada apresenta potencial significativo para aplicação na remoção de substâncias contaminantes presentes na água. Entretanto, sua aplicação requer ajustes operacionais que minimizem fenômenos de colmatação e a eventual liberação de compostos que possam elevar parâmetros como a condutividade elétrica e a turbidez do efluente. De forma geral, os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam que a CCA possui potencial para ser empregada como material adsorvente complementar no tratamento de águas contaminadas por agroquímicos.

REFERÊNCIAS

ANKLEY, Gerald T. *et al.* **Repeating history: pharmaceuticals in the environment.** 2007.

AL BAKAIN, Ramia Z. *et al.* A study on removal characteristics of o-, m-, and p-nitrophenol from aqueous solutions by organically modified diatomaceous earth. **Desalination and Water Treatment**, v. 56, n. 3, p. 826-838, 2015.

ÁLVAREZ-TORRELLAS, S. *et al.* Effective adsorption of non-biodegradable pharmaceuticals from hospital wastewater with different carbon materials. **Chemical Engineering Journal**, v. 320, p. 319-329, 2017.

AGROSUSTENTAR. **Maiores Produtores de Arroz do Brasil e do Mundo.** Available at: <https://agrosustentar.com.br/agronegocio/maiores-produtores-arroz/>. Accessed on: December 3, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Energia de biomassa.** Brasília, DF: ANEEL, [2008?]. Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/Busca/Download?codigoArquivo=177741&tipoMidia=0>. Acesso em: 09 jul. 2025.

AHMAD, Tanweer *et al.* Removal of pesticides from water and wastewater by different adsorbents: a review. **Journal of Environmental Science and Health, Part C**, v. 28, n. 4, p. 231-271, 2010.

_____. **NBR 7217:2022:** Determinação da composição granulométrica de agregados graúdos e miúdos. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.

BARROS, A. M. **Bioadsorção e dessorção dos íons Cd²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, Pb²⁺ e Zn²⁺ pela macrófita aquática azolla pinnata.** 2012. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021.** Diário Oficial da União, Brasília, 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 3 dez. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.** Estabelece a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 35.

BRASIL. **Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000.** Cria a Agência Nacional de Águas e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2000. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em: 19 nov. 2024.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5 jan. 2007. Seção 1, p. 1.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Altera a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 jul. 2020. Seção 1, p. 1.

BOHNER, Tanny Oliveira Lima; ARAÚJO, Luiz Ernani Bonesso; NISHIJIMA, Toshio. O impacto ambiental do uso de agrotóxicos no meio ambiente e na saúde dos trabalhadores rurais. **Revista eletrônica do curso de direito da UFSM**, v. 8, p. 329-341, 2013.

BORTOLUZZI, E. *et al.* Avaliação de risco de contaminação de corpos d'água por pesticidas utilizados na agricultura intensiva. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 5, p. 553-558, 2007.

BRITTO, Fábio Brandão et al. **Monitoramento e modelagem da qualidade da água e agrotóxicos em corpos hídricos no Baixo São Francisco sergipano**. 2015.

CAMARGO, J. A.; ALONSO, Á.; SALAMANCA, A. Nitrate toxicity to aquatic animals: A review with new data for freshwater invertebrates. **Chemosphere**, v. 271, p. 129473, 2021.

CIMIRRO, Nilton FGM *et al.* Removal of pharmaceutical compounds from aqueous solution by novel activated carbon synthesized from lovegrass (Poaceae). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 21442-21454, 2020.

CUSTÓDIO, Aline Maria Baldez. **Desigualdade no acesso ao saneamento básico no Brasil: uma análise a partir das diferenças regionais e de situação do domicílio entre os anos de 2016 e 2022**. 2023.

CUNHA, J. C.; OLIVEIRA, J. G.; PACHECO, A. G. **Bioadsorção de metais pesados: uma revisão bibliográfica**. Apontes, v. 2, n. 2, p. 31-46, 2022.

CUI, Yue *et al.* Removal of organic micro-pollutants (phenol, aniline and nitrobenzene) via forward osmosis (FO) process: evaluation of FO as an alternative method to reverse osmosis (RO). **Water research**, v. 91, p. 104-114, 2016.

DA SILVA RIES, Lúcia Allebrandt; DA SILVEIRA, Joyce Helena. Remoção de Cr (VI) por adsorção empregando carvão ativado comercial e carvão vegetal produzido a partir da casca de arroz. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 6, p. 6477-6494, 2019.

DA ROSA LIRA, Patricia *et al.* Adsorption study of micropollutants by biosorbents from different rice harvest residues for large scale applications. **Ciência e Natura**, v. 46, p. e80262-e80262, 2024.

DE OLIVEIRA, José Carlos; GUILLEN, Rubens Diego Marineli; DE SOUZA SILVA, Daniel. Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021 do ministério da saúde: o ponto de partida para enfrentamento aos contaminantes emergentes Ordinance No. 888, of may 04, 2021 from the ministry of health: the starting point for confronting emerging contaminants. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 30890-30901, 2022.

DEOKAR, Sunil K.; MANDAVGANE, Sachin A. Rice husk ash for fast removal of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid from aqueous solution. **Adsorption Science & Technology**, v. 33, n. 5, p. 429-440, 2015.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1993.

DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Ângela Di Bernardo. Métodos e técnicas de tratamento de água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 11, p. 107-107, 2006.

DONG, W. *et al.* Effective correction of dissolved organic carbon interference in nitrate detection using ultraviolet spectroscopy. **RSC Advances**, [S.I.], 2024.

DOS SANTOS, Josilane Rodrigues; DA SILVA, Joelmir Marques. Toxicologia de agrotóxicos em ambientes aquáticos. **Oecologia brasiliensis**, v. 11, n. 4, p. 565-573, 2007.

DOS SANTOS SANTOS, Sônia Beatriz. Famílias negras, desigualdades, saúde e saneamento básico no Brasil. **Tempus–Actas de Saúde Coletiva**, v. 7, n. 2, p. ág. 41-53, 2013.

EDWARDS, A. M. C. The variation of dissolved constituents with discharge in some Norfolk rivers. **Journal of Hydrology**, v. 18, n. 3-4, p. 219-242, 1973.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Produção de Grãos**. Portal Agro em Dados, s.l., 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agropensa/agro-em-dados/agricultura/graos>. Acesso em: 09 jul. 2025.

EMBRAPA TABULEIROS COSTEIROS. **Uso da biomassa para geração de energia**. Documentos, n. 211. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2016. 30 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1063559/1/Doc211.pdf> Acesso em: 09 jul. 2025.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Think Green Before You Shop**. [S.I.], 26 dez. 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/recycle/think-green-you-shop>. Acesso em: 09 jul. 2025.

ESREY, Steve A.; FEACHEM, Richard G.; HUGHES, James M. Interventions for the control of diarrhoeal diseases among young children: improving water supplies and excreta disposal facilities. **Bulletin of the World Health organization**, v. 63, n. 4, p. 757, 1985.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT: base de dados sobre produção agrícola**. Roma: FAO, [s.d.]. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP/visualize>. Acesso em: 03 dez. 2024.

FERREIRA, P. P. L. *et al.* Adsorção de Cu^{2+} e Cr^{3+} em efluentes líquidos utilizando a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. **Cerâmica**, v. 61, p. 435-441, 2015.

FATEH, S. *et al.* Adsorption of heavy metals from aqueous solution using various adsorbents: A review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 16003-16022, 2021.

FIGUEIREDO, S. A.; BOAVENTURA, R. A.; LOUREIRO, J. M. Color removal with natural adsorbents: modeling, simulation and experimental. **Separation and Purification Technology**, v. 20, n. 1, p. 129-141, 2000.

FOLETTTO, Edson Luiz *et al.* Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, v. 28, p. 1055-1060, 2005.

FRANCISCHETTI, Jaqueline *et al.* **Remoção de metais pesados em efluentes líquidos através da filtração adsortiva**. 2004.

FIOCRUZ BRASÍLIA. **Contaminação da água potável por agrotóxico no Brasil é tema de audiência pública na Câmara dos Deputados**. 14 jun. 2019. Disponível em: <https://www.fiocruzbrasil.fiocruz.br/contaminacao-da-agua-potavel-por-agrotoxico-no-brasil-e-tema-de-audiencia-publica-na-camara-dos-deputados>. Acesso em: 3 dez. 2024.

FU, Fenglian; WANG, Qi. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. **Journal of environmental management**, v. 92, n. 3, p. 407-418, 2011.

GHISI, Diego Brunelli *et al.* **Proposta de um modelo de projeto de filtro rápido bifluxo para tratamento de água de abastecimento**. 2017.

GEORGE, Tchobanoglous; BURTON, Franklin L.; DAVID STENSEL, H. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 2003.

GONÇALVES, Gislayne Elisana *et al.* Síntese e caracterização de mulita utilizando sílica obtida da casca de arroz. **Revista Escola de Minas**, v.62, n.3, p. 367-372, jul./set. 2009. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/a78ad0bd-9dfc-4b2d-a617-beee1a89947b>. Acesso 25 out. 2024.

HELLER, L. **Saneamento básico: aspectos técnicos, econômicos e sociais**. 2. ed. São Paulo: Editora Manole, 2008.

HOSSAIN, Sk S. *et al.* 3D printing of porous low-temperature in-situ mullite ceramic using waste rice husk ash-derived silica. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 42, n. 5, p. 2408-2419, 2022.

HUANG, X. *et al.* Exploring the impact of dissolved organic matter on nitrate detection using ultraviolet spectroscopy. **Journal of Chemical Education**, [S.l.], 2024.

IBRAHIM, Shariff; WANG, Shaobin; ANG, Ha Ming. Removal of emulsified oil from oily wastewater using agricultural waste barley straw. **Biochemical Engineering Journal**, v. 49, n. 1, p. 78-83, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção de arroz: arroz no Rio Grande do Sul**. IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/arroz/rs>. Acesso em: 3 dez. 2024.

INYANG, Mandu *et al.* Removal of heavy metals from aqueous solution by biochars derived from anaerobically digested biomass. **Bioresource technology**, v. 110, p. 50-56, 2012.

Kadirvelu, K., & Namasivayam, C. Agricultural by-product as metal adsorbent: Sorption of lead(II) from aqueous solution onto coirpith carbon. **Waste Management**, 20(1), 29-35, 2000.

KIELING, Amanda Gonçalves; MORAES, Carlos Alberto Mendes; BREHM, Feliciane Andrade. Utilização de cinza de casca de arroz na remoção de cromo hexavalente. **Estudos Tecnológicos**, v. 5, n. 3, p. 351-362, 2009.

KIELING, Amanda Gonçalves. **Adsorção de BTEX-Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno em cinza de casca de arroz e carvão ativado**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

KASPERISKI, Fernando M. *et al.* Production of porous activated carbons from *Caesalpinia ferrea* seed pod wastes: Highly efficient removal of captopril from aqueous solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 197, p. 919-929, 2018.

Kumar, M., & Gaur, A. **Climate variability impacts on land use and livelihoods in drylands**. In *Climate Change and Land Use in Drylands: Interactions and Impacts* (pp. 145-162). Springer, 2018.

KUMAR, R. *et al.* Identification and characterization of a novel species of genus *Akkermansia* with metabolic health effects in a diet-induced obesity mouse model. **Microorganisms**, v. 10, n. 9, p. 1885, 2022.

LIBÂNIO, Marcelo. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. **Átomo**, 2008.

LIN, Yunqing *et al.* RNAInter in 2020: RNA interactome repository with increased coverage and annotation. **Nucleic acids research**, v. 48, n. D1, p. D189-D197, 2020.

LI, X. *et al.* Efeito da cinza de casca de arroz nas propriedades físicas de compósitos de fibra de palha de arroz e matriz polimérica. **Journal of Materials Science**, v. 58, n. 2, p. 1001-1010, 2023.

LIMA, Diana Ramos *et al.* Removal of amoxicillin from simulated hospital effluents by adsorption using activated carbons prepared from capsules of cashew of Para. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 16396-16408, 2019.

LUCENA, Guilherme Leocárdio *et al.* Cinética de adsorção de cobre (II) utilizando bioadsorventes. **Scientia Plena**, v. 8, n. 9, 2012.

MARTINS, Rafael Xavier. **Herbicida ácido 2, 4-diclorofenoxiacético (2, 4-D): investigação dos efeitos sobre o desenvolvimento, estresse oxidativo e parâmetros hepáticos em embriões e larvas de zebrafish (Danio rerio)**. 2021.

MEDEIROS FILHO, C. F. **Apostila abastecimento de água**. Campina Grande, 2009.

MORIN-CRINI, Nadia *et al.* Worldwide cases of water pollution by emerging contaminants: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 20, n. 4, p. 2311-2338, 2022.

MONTAGNER, Cassiana C.; VIDAL, Cristiane; ACAYABA, Raphael D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Química nova**, v. 40, n. 9, p. 1094-1110, 2017.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 2020.

NOURI, S.; HAGHSERESHT, F. Adsorption of p-nitrophenol in untreated and treated activated carbon. **Adsorption**, v. 10, p. 79–86, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:ADSO.0000024037.31407.15>.

N'DIAYE, A. D. *et al.* Potential of rice husk ash in atrazine removal. **Chemistry and Ecology**, v. 35, n. 7, p. 678-692, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Relatório dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável de 2023**. Nova York: ONU, 2023. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>. Acesso em: 09 jul. 2025.

ONU BRASIL. **O que são as mudanças climáticas?** ONU Brasil, 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-s%C3%A3o-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas>. Acesso em: 3 dez. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6: Água potável e saneamento**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>. Acesso em: 3 dez. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 3 dez. 2024.

PAULETTO, P. S. *et al.* Novel biochar and hydrochar for the adsorption of 2-nitrophenol from aqueous solutions: an approach using the PVSDM model. **Chemosphere**, v. 269, p. 128748, 2021.

PEREIRA, Fábio. **Remoção dos íons Cr³⁺ utilizando a cinza da casca de arroz como adsorvente**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

PEREIRA, A. P. *et al.* **CCA sem tratamento prévio: remoção de imidacloprido (IMI)**. Disponível em: <https://seisicite.com.br/storage/seisicite-trabalhos-finais/1146-5d1420b9c1a900eb712bce90b7dbdbeb1250d5f244bdda623faf0ec17f4d8eb6.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2025.

RETONDAR, Anderson Moebus. A (re)construção do indivíduo: a sociedade de consumo como “contexto social” de produção de subjetividades. **Sociedade e Estado, Brasília**, v. 23, n. 1, p. 137–160, jan./abr. 2008.

RUTHVEN, Douglas M. **Principles of adsorption and adsorption processes**. New York: John Wiley & Sons, 1984.

SAHA, Ajoy *et al.* Simultaneous removal of pesticides from water by rice husk ash: batch and column studies. **Water Environment Research**, v. 86, n. 11, p. 2176-2185, 2014.

SILVA, Marcela Fernandes *et al.* Usability of simplified UV–Vis spectrophotometric methods for the determination of nitrate in the presence of organic matter and chloride as interfering factors. **Water Practice & Technology**, v. 19, n. 3, p. 1061-1070, 2024.

SILVA, Marta de Oliveira da Silva. Participação e controle social para equidade em saúde da população negra. In: **Participação e controle social para equidade em saúde da população negra**. 2007. p. 68-68.

SANTOS, Carmenlucia. **Prevenção à poluição industrial: identificação de oportunidades, análise dos benefícios e barreiras**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SONG, G. *et al.* Anthracite coal-based activated carbon for elemental Hg adsorption in simulated flue gas: Preparation and evaluation. **Fuel**, v. 275, p. 117921, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117921>.

TEJADA, Candelaria; QUIÑONEZ, Edgar; PEÑA, Margaret. Contaminantes emergentes en aguas: metabolitos de fármacos. Una revisión. **Revista Facultad de Ciencias Básicas**, v. 10, n. 1, p. 80-101, 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **About green engineering**. Disponível em: <https://www.epa.gov/green-engineering/about-green-engineering>. Acesso em: 3 dez. 2024.

UNICEF. **Água, saneamento e higiene: status global 2024**. Nova York: UNICEF, 2024. Disponível em: <https://www.unicef.org/water-sanitation-and-hygiene-wash>. Acesso em: 09 jul. 2025.

VIANNA, M. R. **Hidráulica Aplicada às Estações de Tratamento de Água**. 5. ed. Belo Horizonte: Imprimatur, 2010.

WAJSMAN, Ester Nigri. **Concepção de estação piloto de tratamento de água no Centro Experimental de Saneamento Ambiental da UFRJ-CESA/UFRJ**. 2014.