

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO/RS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AMBIENTE E TECNOLOGIAS
SUSTENTÁVEIS

RENATA WELTER MARTINS

TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO DO MEIO RURAL POR
COAGULAÇÃO ORGÂNICA E DUPLA FILTRAÇÃO EM AREIA E CARVÃO ATIVADO
GRANULAR

CERRO LARGO/RS

2025

RENATA WELTER MARTINS

**TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO DO MEIO RURAL POR
COAGULAÇÃO ORGÂNICA E DUPLA FILTRAÇÃO EM AREIA E CARVÃO ATIVADO
GRANULAR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis (PPGATS) da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Mestre em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Dr.^a Alcione Aparecida de Almeida Alves

Coorientadora: Dr.^a Aline Raquel Müller Tones

CERRO LARGO/RS

2025

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Martins, Renata Welter

TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO DO MEIO RURAL POR
COAGULAÇÃO ORGÂNICA E DUPLA FILTRAÇÃO EM AREIA E CARVÃO
ATIVADO GRANULAR / Renata Welter Martins. -- 2025.
101 f.

Orientadora: Dr^a Alcione Aparecida de Almeida Alves

Co-orientadora: Dr^a Aline Raquel Müller Tones

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da
Fronteira Sul, Programa de Pós-Graduação em Ambiente e
Tecnologias Sustentáveis, Cerro Largo, RS, 2025.

1. Tratamento de água. 2. Meio Rural. 3. Tecnologia.
I. Alves, Alcione Aparecida de Almeida, orient. II.
Tones, Aline Raquel Müller, co-orient. III. Universidade
Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO DO MEIO RURAL POR COAGULAÇÃO ORGÂNICA E DUPLA FILTRAÇÃO EM AREIA E CARVÃO ATIVADO GRANULAR

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis (PPGATS) da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Mestre em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 14/03/2025.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

ALCIONE APARECIDA DE ALMEIDA ALVES

Data: 28/04/2025 21:43:14-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Alcione Aparecida de Almeida Alves– UFFS Orientadora



Documento assinado digitalmente

ALINE RAQUEL MULLER TONES

Data: 28/04/2025 21:20:31-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Aline Raquel Müller Tones– UFFS Coorientadora



Documento assinado digitalmente

LIZIARA DA COSTA CABRERA

Data: 28/04/2025 21:29:14-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr.^a Liziara da Costa Cabrera Avaliadora



Documento assinado digitalmente

FERNANDO HYMNÔ DE SOUZA

Data: 25/04/2025 12:01:19-0300

CPF: ***.830.318-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr. Fernando Hymnô de Souza Avaliador

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me
aplaudiram tão alto que eu nem ouvi quem não
aplaudiu.

AGRADECIMENTOS

Quando concluímos algo é inevitável não recordarmos as razões que nos motivaram a começar, e continuar. Fazendo um repasso por todos os momentos vividos na trajetória da pós-graduação me deparei com pessoas grandiosas com as quais tive o prazer de conviver, estas que me ajudaram a crescer, compreender e acima de tudo a não desistir.

Talvez estes agradecimentos seja a parte mais complexa deste trabalho, afinal foram tantas pessoas que direta ou indiretamente, algumas sem ao menos saber da sua importância, ajudaram na realização desta pesquisa.

Agradeço a todos os meus familiares que acreditaram e apoiaram nesse sonho, em especial agradeço imensamente aos meus pais, por acreditar em mim, me apoiar, me dar suporte, educação e muito amor. Mãe e pai, gostaria que vocês soubessem que não existe amor e admiração maior do que a eu sinto por vocês, mesmo que as vezes eu não consiga demonstrar isso.

A pós-graduação é desafiadora, e talvez o maior ensinamento que ela nos passa é sobre resiliência. A busca constante pelo sucesso, por grandes produções acadêmicas e destaque, por vezes nos faz esquecer que somos todos seres humanos e não precisamos buscar a perfeição.

E por falar em resiliência, preciso agradecer a melhor pessoa que conheci na pós-graduação: Milena Santiago Chiquim. A energia das pessoas com quem convivemos e admiramos nos transforma, afinal somos reflexo, e por isso, por todas as conversas e experiências que tivemos, digo com toda certeza que a Renata que saí do mestrado é uma pessoa totalmente diferente da que entrou, uma pessoa melhor.

Agradeço todos meus amigos pelo suporte e apoio, e peço perdão por todas as vezes que não pude me fazer presente por estar estudando ou trabalhando no laboratório. Agradeço ao meu amor Charles Rakowski, que chegou no final dessa jornada, e que de forma instantânea não mediu esforços para me motivar, me apoiar, me ajudar, gratidão por todo suporte, não seria tão leve se não tivesse você ao meu lado, obrigada.

Agradeço aos meus colegas do Laboratório de Águas e Ecotoxicologia pelo auxílio e suporte durante todas as etapas. Agradeço aos técnicos e servidores da Universidade Federal da Fronteira Sul pelo auxílio, em especial agradeço ao técnico Rodrigo Machado, obrigada não só pelo suporte, mas também pelas conversas, brincadeiras e por todo apoio, sempre que lembrar de você vou lembrar com um carinho gigantesco.

Agradeço a minha orientadora, prof.^a Dr.^a Alcione Aparecida de Almeida Alves e também à minha coorientadora prof.^a Dr.^a Aline Raquel Müller Tones, obrigada por me orientarem com maestria.

Agradeço a Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) e ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis (PPGATS) pela oportunidade, pelo suporte e pelo ensino gratuito e de qualidade ofertado.

Por fim, agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de mestrado, suporte fundamental para o seguimento das pesquisas. A pesquisa científica liberta, educa, evolui e nunca pode parar.

Mesmo sem saber o próximo passo e com o coração cheio de incertezas, tudo valeu muito a pena. Gostaria de finalizar estes agradecimentos com um trecho da música Sonho da Banda Atitude 67, afinal: “Mas sei que a minha escolha é só minha e eu escolho que já é hora do voo e hoje o céu já fez silêncio. Eu acho tão bonito quando a gente segue um sonho e não quer mais voltar.”

Obrigada a todos!

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar.
Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota. (Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

A água potável é um recurso fundamental para garantia da qualidade da vida humana, entretanto o acesso seguro tem-se tornado um desafio, especialmente devido crescente exposição as fontes de poluição provenientes da descarga inadequada de resíduos industriais, atividades agrícolas e esgotamento sanitário, bem como os períodos de escassez frequentemente relatados. Neste sentido, a investigação de novas tecnologias e aprimoramento de tecnologias já consolidadas no tratamento de água torna-se uma alternativa viável e fundamental para garantia do acesso seguro a água de potável. Esta pesquisa apresenta a investigação de uma nova configuração de tratamento, o Reator de Leito Fixo Contínuo (RLFC), pós-coagulação orgânica e desinfecção final no tratamento de água superficial de uma pequena comunidade rural do interior do Rio Grande do Sul. A pesquisa foi dividida em duas etapas: a primeira contemplou a etapa de pré-tratamento, onde foi realizada a clarificação da água superficial bruta com o uso de um coagulante orgânico, a segunda e principal etapa contemplou o tratamento através do RLFC. A primeira etapa investigou a clarificação da água superficial bruta com o uso de um coagulante orgânico, para tal um planejamento fatorial completo 2^3 foi empregado. Considerou-se a otimização máxima das variáveis independentes dosagem de coagulante, velocidade de agitação e tempo de contato, com base na remoção das variáveis dependentes cor aparente e turbidez. Na segunda etapa empregou-se a filtração rápida em um filtro granular de camada dupla no RLFC, tendo as camadas compostas por areia de quartzo (0,25 m) e carvão ativado granular (CAG) (0,45m) em fluxo descendente, com desinfecção final acoplada ao RLFC. Nesta etapa a eficiência foi baseada no atendimento dos parâmetros de potabilidade descritos nas Portarias MS N° 5/2017 e N° 888/2021, sendo monitorados os parâmetros físico-químicos: cor aparente, turbidez, pH, condutividade elétrica, alcalinidade e cloro livre, e microbiológicos: coliformes totais e *Escherichia coli*. Considerou-se ainda o monitoramento dos parâmetros hidráulicos perda de carga e taxa de aplicação superficial (TAS). Os resultados da clarificação indicaram a remoção de aproximadamente 52% de cor aparente e 47% de turbidez, com uma dosagem ótima de coagulante de $0,83 \text{ mL L}^{-1}$, agitação de 245 RPM e 10 min de tempo de contato, proporcionando uma condição favorável para posterior aplicação do tratamento no RLFC. Os resultados de análises dos parâmetros físico-químicos do RLFC foram submetidos à análise estatística para determinação da variação entre a água clarificada que adentrava o tratamento e a água tratada por ciclo completo, onde foi observada uma diferença significativa ($p < 0,05$) para: cloro livre, pH, condutividade elétrica, cor aparente e turbidez. Ainda, o tratamento no RLFC deve sua eficiência garantida pelo atendimento aos

parâmetros de potabilidade ao fim do tratamento. O RLFC operou em condições até o consumo de onze volumes de leito ($0,03283 \text{ m}^3$), nestas condições aplicou-se uma taxa de aplicação superficial máxima de $165,09 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{dia}^{-1}$, atingindo uma perda de carga máxima de 99 cm ao fim da operação. A configuração de tratamento investigada nesta pesquisa indicou resultados promissores para a potabilização da água superficial destinada ao abastecimento público, sendo uma alternativa para suprir a lacuna da fragilidade dos sistemas de tratamento de água no meio rural.

Palavras-Chave: Tratamento de água; Filtração rápida; Clarificação; Carvão ativado granular.

ABSTRACT

Drinking water is a fundamental resource for ensuring the quality of human life, however, safe access has become a challenge, especially due to the increasing exposure to sources of pollution from inadequate discharge of industrial waste, agricultural activities and sewage, as well as the frequently reported periods of scarcity. In this sense, the investigation of new technologies and improvement of already consolidated technologies in water treatment becomes a viable and fundamental alternative to guarantee safe access to drinking water. This research presents the investigation of a new treatment configuration, the Continuous Fixed Bed Reactor (CFBR), organic post-coagulation and final disinfection in the treatment of surface water of a small rural community in the interior of Rio Grande do Sul. The research was divided into two stages: the first contemplated the pre-treatment stage, where the clarification of raw surface water was carried out with the use of an organic coagulant, the second and main stage contemplated the treatment through the CFBR. The first stage investigated the clarification of raw surface water using an organic coagulant. For this purpose, a 2^3 full factorial design was employed. The maximum optimization of the independent variables coagulant dosage, agitation speed, and contact time was considered, based on the removal of the dependent variables apparent color and turbidity. In the second stage, rapid filtration was used in a double-layer granular filter in the CFBR, with layers composed of quartz sand (0.25 m) and granular activated carbon (GAC) (0.45 m) in downward flow, with final disinfection coupled to the CFBR. In this stage, the efficiency was based on meeting the potability parameters described in MS Ordinances N° 5/2017 and N° 888/2021, with the physical-chemical parameters being monitored: apparent color, turbidity, pH, electrical conductivity, alkalinity, and free chlorine, and microbiological parameters: total coliforms and *Escherichia coli*. The monitoring of the hydraulic parameters pressure drop and surface application rate (SAR) was also considered. The clarification results indicated the removal of approximately 52% of apparent color and 47% of turbidity, with an optimal coagulant dosage of 0.83 mL L⁻¹, agitation of 245 RPM and 10 minutes of contact time, providing a favorable condition for subsequent application of the treatment in the CFBR. The results of the analysis of the physical-chemical parameters of the CFBR were subjected to statistical analysis to determine the variation between the clarified water entering the treatment and the water treated by the complete cycle, where a significant difference ($p < 0.05$) was observed for: free chlorine, pH, electrical conductivity, apparent color and turbidity. Furthermore, the treatment in the CFBR owes its efficiency guaranteed by meeting the potability parameters at the end of the treatment. The CFBR

operated under conditions up to the consumption of eleven bed volumes (0.03283 m^3). Under these conditions, a maximum surface application rate of $165.09 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{day}^{-1}$ was applied, reaching a maximum head loss of 99 cm at the end of the operation. The treatment configuration investigated in this research indicated promising results for the potabilization of surface water intended for public supply, being an alternative to fill the gap of the fragility of water treatment systems in rural areas.

Keywords: Water treatment; Rapid filtration; Clarification; Granular activated carbon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais processos de tratamento de água para consumo humano.....	30
Figura 2 – Representação esquemática dos poros e grupos funcionais do carvão ativado.....	40
Figura 3 – Mapa de localização do ponto de coleta da água superficial	43
Figura 4 – Fluxograma de trabalho adotado durante os testes.....	44
Figura 5 – Processo simplificado de trabalho adotado na etapa de coagulação, floculação e sedimentação.....	48
Figura 6 – Representação do RLFC.....	50
Figura 7 – Visão geral do funcionamento do RLFC.....	52
Figura 8 – Camada utilizadas no RLFC.....	53
Figura 9 – Dosador de cloro acoplado ao RLFC.....	56

FIGURAS – ARTIGO

Figura 1 – Fluxograma do processo de tratamento.....	60
Figura 2 – Esquema do sistema RLFC.....	64
Figura 3 – Estimativa de efeito padronizada com base em variáveis de resposta.....	69
Figura 4 – Superfície de resposta em relação à redução de cor aparente.....	71
Figura 5 – Superfície de resposta em relação à redução de turbidez.....	71
Figura 6 – Desejabilidade global do planejamento experimental da clarificação.....	72
Figura 7 – Variabilidade dos parâmetros avaliados ao longo do tratamento pelo RLFC.....	75
Figura 8 – Comportamento hidráulico do RLFC em relação a perda de carga e TAS.....	80

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 – Classes de qualidade de água e usos preponderantes.....	26
Quadro 2 – Alguns dos principais parâmetros relacionados a potabilidade da água.....	28
Quadro 3 – Estudos recentes utilizando carvão ativado na aplicabilidade do tratamento de água.....	38
Tabela 1 – Principais diferenças entre os filtros lentos e rápidos/diretos de acordo com a ABNT NBR nº 12.216:1992.....	33
Tabela 2 – Parâmetros de caracterização da água superficial bruta.....	44
Tabela 3 – Matriz do delineamento experimental.....	46
Tabela 4 – Propriedades físico-químicas do agente coagulante.....	49
Tabela 5 – Composição camada suporte do RLFC.....	54
Tabela 6 – Parâmetros físico-químicos e microbiológicos monitorados.....	55

TABELAS E QUADROS-ARTIGO

Quadro 1 – Detalhamento construtivo e operacional do RLFC.....	65
Quadro 2 – Avaliação geral do RLFC em comparação com os parâmetros hidráulicos e físico-químicos entre AC e ATCC.....	82
Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos e microbiológicos monitorados	61
Tabela 2 – Valores estudados para as variáveis independentes no delineamento fatorial completo 2 ³	63
Tabela 3 – Condições experimentais e resultados obtidos do delineamento experimental para remoção de cor aparente (%) e turbidez (%) da água superficial bruta.....	68
Tabela 4 – Estimativa dos efeitos das variáveis independentes.....	70
Tabela 5 – Atendimento aos padrões de potabilidade de acordo com o padrão de potabilidade da água inferido nas Portarias nº 05/2017 e nº 888/2021 do Ministério da Saúde.....	74
Tabela 6 – Relação estatística da eficiência de tratamento do RLFC.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

< Maior
> Menor
 $\leq$ Maior ou Igual
 $\geq$ Maior ou Igual
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC – Água Clarificada
ANOVA – Análise de Variância
ATCC – Água Tratada em Ciclo Completo
CAG – Carvão Ativado Granular
CAP – Carvão Ativado em Pó
 cm min^{-1} – Centímetro por Minuto
CO – Monóxido de Carbono
 CO_3 – Carbonato
DCCR – Delineamento Composto Central Rotacional
DN – Diâmetro Nominal
ETA – Estação de Tratamento de Água
 H_2S – Sulfeto de Hidrogênio
 HCO_3 – Bicarbonato
MS – Ministério da Saúde
NBR – Normas Brasileiras Regulamentadoras
 OH^- Hidróxido
OMS – Organização Mundial da Saúde
ONU – Organização das Nações Unidas
Pt-Co – Platina-Cobalto
PVC – Policloreto de Vinila
RLFC – Reator de Leito Fixo Contínuo
RS – Rio Grande do Sul
TAS – Taxa de Aplicação Superficial
uH - Unidade de Hazen
UNT – Unidade de Turbidez
VND – Valor Não Definido
VPM – Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo geral	20
1.1.2	Objetivos específicos	20
2	REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1	ÁGUA DE ABASTECIMENTO PÚBLICO.....	22
2.1.1	ÁGUAS SUPERFICIAIS PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO.....	23
2.2	PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E DE POTABILIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO	25
2.2.1	Padrões de qualidade das águas superficiais	25
2.2.2	Padrões de potabilidade da água de abastecimento	27
2.3	SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA	29
2.3.1	Sistemas Convencionais	30
2.3.2	Sistemas Avançados	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1	ÁREA E ÁGUA DE ESTUDO	42
3.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA SUPERFICIAL	43
3.3	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	44
3.3.1	Planejamento experimental	45
3.4	PROCESSO DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO	47
3.4.1	Coagulante	48
3.5	REATOR DE LEITO FIXO CONTÍNUO	50
3.5.1	Filtração em dupla camada	53
3.5.2	Parâmetros físico-químicos e hidráulicos	54
3.5.3	Desinfecção.....	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	ARTIGO	57
1.	INTRODUÇÃO	57
2.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
2.1.1	Planejamento experimental e análise estatística da clarificação da água	62
2.2	REATOR DE LEITO FIXO CONTÍNUO (RLFC) – ETAPA 2.....	63

3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
3.1	CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA SUPERFICIAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA DA OTIMIZAÇÃO DA COAGULAÇÃO ORGÂNICA-ETAPA 1	67
3.2	PERFORMANCE DE TRATAMENTO DO RLFC PÓS-CLARIFICAÇÃO	73
3.2.1	Análise estatística do RLFC	78
3.2.2	Comportamento hidráulico do RLFC	79
3.3.3	Avaliação geral do sistema empregado	81
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
	REFERÊNCIAS ARTIGO	85
5	CONCLUSÃO	91
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

A garantia do acesso a água potável é um direito básico de todas as pessoas, entretanto a universalização de abastecimento ainda é um desafio. Pesquisas recentes indicam um cenário com aproximadamente 350 milhões de pessoas que poderão enfrentar problemas relacionados a escassez hídrica até 2030 (WHO, 2023). Além da garantia da manutenção da vida, os recursos hídricos são fundamentais para o desenvolvimento econômico e social (Sun *et al.*, 2023).

Apesar de avanços evidentes nas últimas décadas, o Brasil ainda enfrenta obstáculos na universalização dos serviços de abastecimento de água tratada, especialmente pela falta de investimentos em determinadas regiões. Estima-se que aproximadamente 84,9% dos brasileiros possuem sistema de abastecimento de água tratada, todavia mais de 33 milhões de brasileiros ainda não possuem nenhum tipo de acesso ao serviço (Brasil, 2022). Esse cenário é acentuado nas áreas em situação de vulnerabilidade social ou rurais.

O abastecimento público de água em áreas rurais é feito predominantemente através da captação em poços, olhos d'água, nascentes ou cisternas. Em geral, estes sistemas não costumam apresentar nenhum tipo de tratamento ou proteção, oferecendo grandes riscos à saúde humana (Melo *et al.*, 2020). A ausência, ineficiência ou fragilidade estrutural dos sistemas de tratamento de água representam um risco potencial a formação de cenários de calamidade pública pelo aumento de doenças de veiculação hídrica (Ferreira *et al.*, 2021).

Ainda, o desafio da universalização ao acesso seguro de água potável é agravado pela constante ameaça à qualidade dos recursos hídricos. As atividades antrópicas são atualmente a principal fonte de ameaça a qualidade dos recursos hídricos, especialmente devido ao descarte incorreto de efluentes domésticos/industriais, pecuária, mineração e lixiviação de atividades agropecuárias. As avaliações dos recursos hídricos nos últimos anos demonstram um crescente aumento na presença de compostos nocivos aos ecossistemas aquáticos e à saúde humana, como fármacos, metais pesados, agrotóxicos, microrganismos nocivos (Uddin; Nash; Olbert, 2021) (Li; Wu, 2019).

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), os sistemas convencionais de tratamento de água contemplam procedimentos físicos e químicos aplicados na água para garantir condições adequadas para o consumo humano. Os sistemas convencionais comumente são divididos nas seguintes operações unitárias: coagulação, floculação, decantação, filtração, correção de pH, desinfecção e fluoretação.

Ressalta-se que, os serviços de abastecimento de água não contemplam apenas os sistemas de tratamento, mas também as redes de distribuição. Estas, compreendem as redes de

canalização subterrânea projetadas para distribuir a água tratada até a população atendida e, tais sistemas demandam custos estruturais e de manutenção (Monteiro *et al.*, 2020). Fatores que contribuem para a dificuldade de execução em áreas rurais, especialmente pelo distanciamento geográfico.

No Brasil, o padrão de potabilidade da água é definido pelo Anexo XX da Portaria da Consolidação Nº 5/2017 e suas alterações pela Portaria Nº 888/2021, ambas do Ministério da Saúde. De acordo com as referidas portarias, para ser considerada potável a água servida a população não deve oferecer risco a saúde humana em nenhuma etapa, atendendo os parâmetros de potabilidade físicos, químicos, microbiológicos e radiativos. Dessa forma, para garantir a segurança da água servida as populações, a maioria das Estações de Tratamento de Água (ETA) utilizam os sistemas convencionais para o tratamento, especialmente devido a simplicidade e baixo custo.

Dentro dos sistemas convencionais de tratamento, o mais utilizado é o processo de filtração, empregado para remoção de sedimentos, partículas suspensas e até mesmo alguns contaminantes biológicos. O meio filtrante mais utilizado é a areia, por onde à medida que a água flui os contaminantes ficam retidos nos vazios do meio filtrante (Hasan; Muhammad; Ismail, 2020).

Ainda, uma etapa fundamental para a garantia da eficiência das demais etapas é a coagulação. Na coagulação as partículas são removidas através da desestabilização dos contaminantes, formando agregados maiores que podem ser facilmente removidos através dos processos de sedimentação ou até mesmo filtração (Russo; Pimentel; Hemsli, 2020).

Os principais coagulantes utilizados nas ETA's são aqueles de origem inorgânica, especialmente sais de alumínio ou ferro, devido sua alta capacidade de remoção de poluentes, seu baixo custo e fácil acessibilidade. Entretanto, o uso destes coagulantes tem levantado uma preocupação ambiental e de saúde pública nos últimos anos devido ao seu uso ocasionar a produção de um alto volume de lodo e elevada concentração de metais residuais na água. Dessa, o uso de coagulantes naturais tem-se intensificado, garantindo a qualidade da remoção dos contaminantes com menor geração de lodo, sem ajustes de pH e alcalinidade e não oferecendo riscos à saúde humana (Benalia *et al.*, 2024).

Apesar de robustos e eficientes, atualmente os sistemas de tratamento convencionais podem apresentar limitações para remoção de contaminantes frequentemente relatados em águas, como os contaminantes emergentes. As limitações desses sistemas têm exigido novas tecnologias, ou combinações de tecnologias avançadas e convencionais capazes de remover

estes contaminantes da água, garantindo a qualidade de abastecimento (Dong *et al.*, 2021) (Ikhlaq *et al.*, 2022).

As tecnologias avançadas de tratamento são processos com alta capacidade de degradação de uma ampla gama de poluentes. Os sistemas avançados podem ser empregados nas mais diversas etapas de tratamento, desde um processo preliminar de clarificação até uma etapa de polimento do tratamento convencional. Os principais sistemas avançados empregados no tratamento de água envolvem tecnologias de ozonização, filtração por membrana, processos oxidativos, processos eletrolíticos, adsorção por carvão ativado, entre outros (Fujioka *et al.*, 2021).

A adsorção em carvão ativado consiste na remoção de contaminantes por interações físicas e químicas entre o adsorvente e o adsorbato, onde os contaminantes são retidos nos poros do material. O carvão ativado possui uma superfície hidrofóbica, alta porosidade e propriedades de superfície ajustáveis as quais fazem com que o material seja considerado um poderoso adsorvente para matéria orgânica e micropoluentes (Mariana *et al.*, 2021) (Paulino *et al.*, 2023).

A combinação de tecnologias para o tratamento de água pode ser considerada extremamente vantajosa. Diante disto, Alves (2018)¹ propôs uma nova configuração de reator combinando os processos de filtração e adsorção em carvão ativado granular (CAG) para potabilização de água em escala real, chamado Reator de Leito Fixo Contínuo (RLFC). Resultados obtidos em estudos preliminares ao RLFC evidenciaram a capacidade de tratamento por essa nova configuração de sistema. Além disso, o RLFC foi projetado para atender a lacuna existente de sistemas descentralizados de tratamento de água no meio rural.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de um Reator de Leito Fixo Contínuo (RLFC) em dupla camada filtrante pós-coagulação para o tratamento de água superficial do meio rural.

1.1.2 Objetivos específicos

Otimizar a aplicação do coagulante orgânico para clarificação da água superficial através de um Delineamento Composto Central Rotacional.

¹ Desenvolvido por Alves (2018) de acordo com a Chamada Universal MCTIC/CNPq nº28/2018.

Avaliar o desempenho do RLFC para o tratamento da água superficial do meio rural pós tratamento preliminar de coagulação, considerando o monitoramento e mensuração dos parâmetros hidráulicos (perda de carga e taxa de aplicação superficial), físico-químicos (cor aparente, turbidez, pH, condutividade, alcalinidade e cloro livre) e microbiológicos (coliformes totais e *Escherichia coli*) em todas as etapas de trabalho.

Avaliar a eficiência de tratamento da água superficial do meio rural de acordo com as legislações vigente, sendo Anexo XX da Portaria da Consolidação Nº 05/2017 alterada pela Portaria Nº 888/2021 do Ministério da Saúde.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico encontram-se listados os principais pressupostos teóricos diante das problemáticas oriundos da potabilização de água superficial para o consumo humano em áreas rurais, abordando tecnologias aplicáveis para tratamento, tal como emprego da coagulação por coagulante orgânico, filtração rápida em areia e adsorção em CAG.

2.1 ÁGUA DE ABASTECIMENTO PÚBLICO

Um dos maiores desafios de saúde pública enfrentados na atualidade é a segurança da qualidade da água de abastecimento. Assegurado pela Organização das Nações Unidas (ONU), o acesso a água potável, em qualidade e quantidade, é um direito básico de todas as pessoas (UNGA, 2010). Ainda assim, dados da Organização Mundial da Saúde (OMS) evidenciaram que 1 em 4 pessoas ainda não possuem acesso a água potável gerida de forma segura, realidade acentuada em comunidades em situação de vulnerabilidade social ou rurais (Oliveira, 2017; WHO, 2023).

A água destinada ao consumo deve atender parâmetros de potabilidade, monitoramento e análise de forma que não representem riscos à saúde humana. Entretanto, a garantia de uma água de qualidade se encontra em constante ameaça dada a vasta poluição dos recursos hídricos decorrente das atividades antrópicas (Sirocic *et al.*, 2023).

Assim como pela constante ameaça da poluição, a manutenção e aprimoramento dos serviços de abastecimento de água são frequentemente acometidos por fatores como condições hidrológicas, crescimento populacional, aumento do consumo *per capita*, crescimento dos centros urbanos e alterações climáticas. Além disto, questões técnicas e políticas também contribuem para a suscetibilidade de sistemas de abastecimento ineficientes (Achore; Bisung; Kuusaana, 2020).

As preocupações atuais sobre a potabilidade da água de abastecimento concentram-se na excessiva descarga de contaminantes nos corpos hídricos, decorrente de atividades naturais e antrópicas e ameaçam a saúde e bem-estar do ser humano, dos organismos aquáticos e do meio ambiente (Farouk; Jamil; Latip, 2023).

As questões de saúde pública relacionadas a qualidade da água servida as populações tem levantado ainda mais preocupações devido a variabilidade climática dos últimos anos. Onde com alterações na temperatura e padrão de precipitação tem-se identificado o aumento da incidência de doenças de veiculação hídrica em períodos extremos, como as inundações

repentinamente (Ahmed; Zounemat-Kermani; Scholz, 2020). Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), aproximadamente 60% das internações hospitalares possuem alguma relação com a ausência ou ineqüação do saneamento básico, ainda 90% destas são provocadas pela falta de potabilidade da água de abastecimento.

Além do controle da poluição, existem outras preocupações acerca da gestão dos recursos hídricos, como contaminação da água nos sistemas de distribuição, crescente escassez de água e o potencial para reutilização e conservação da água, implementação de sistemas inovadores de saneamento de baixo custo, fornecer abastecimento de água e saneamento sustentáveis, reduzir as disparidades globais e regionais no acesso à água e ao saneamento e desenvolver serviços de água e saneamento financeiramente sustentáveis (Moe; Rheingans, 2006).

A resolução dos problemas de abastecimento público de água enfrentados na atualidade demanda de investigações de novas tecnologias para tratamento de água, buscando conciliar benefícios econômicos, sociais e ambientais. Métodos de tratamento mais eficazes, de baixo custo, tecnologicamente inovadores e robustos tornam-se cada vez mais necessários para satisfazer a demanda pela busca de água de qualidade. Diante de tal situação, pesquisadores têm buscado investigar alternativas para suprir o abastecimento público de água com fontes e tratamentos alternativos, ou ainda inovações nos processos convencionais empregados (Tlili; Alkanhal, 2019; Chiquim *et al.*, 2024).

Uma alternativa é captação de água superficial para realização de tratamento adequado e posterior abastecimento público, entretanto, o abastecimento por fontes superficiais de água ainda apresenta falhas provenientes de sistemas de tratamento incompletos e/ou ineficazes (Diniz; Santos, 2022).

2.1.1 ÁGUAS SUPERFICIAIS PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO

No Brasil aproximadamente 43% dos municípios tem seu abastecimento através de mananciais superficiais (ANA, 2021). Considerada uma excelente alternativa para suprir a demanda, é importante garantir não apenas a captação, mas também o tratamento adequado das águas superficiais, visto que essa fonte está mais suscetível a contaminações se comparada as águas subterrâneas (Feretti *et al.*, 2020).

Ainda que reconhecida sua importância para suprir a demanda, o uso de águas superficial para abastecimento público apresenta algumas limitações, visto que estes recursos estão sobre forte ameaça à poluição proveniente das atividades humanas, como lançamento de

efluentes domésticos, agricultura e industrialização. Uma das maiores ameaças a qualidade e quantidade destes recursos é a presença de microrganismos, resíduos farmacêuticos, metais pesados e poluentes nocivos, os quais chegam até os lagos, represas, canais, rios e córregos pela descarga de efluentes de forma incorreta nos corpos hídricos. A presença destes contaminantes é um desafio para os sistemas convencionais de tratamento de água, pela complexidade destas moléculas e sua persistência no ambiente (Hairom *et al.*, 2021). A maioria das substâncias identificadas em águas superficiais ocorrem em concentrações na faixa de ng L^{-1} e $\mu\text{g L}^{-1}$, porém mesmo em baixas concentrações possuem potencial para formar misturas complexas, com efeitos tóxicos variados e de difícil remoção do ambiente (Riva *et al.*, 2019).

As alterações na qualidade da água superficial, a dificuldade de tratamento e a necessidade de suprir a demanda por água potável evidenciam a necessidade da aplicação e domínio de processos e tecnologias adequadas para produção de água de forma a atender os padrões de potabilidade. Embora os sistemas convencionais de tratamento apresentem potencial e sejam bem projetados, o tratamento de água superficial demanda de algumas etapas adicionais, devido à complexidade que a matriz pode apresentar, como altas concentrações de sólidos dissolvidos, presença de contaminantes emergentes e patógenos (Chauque; Brandão; Rott, 2022).

A produção de água potável por fontes superficiais exige etapas essenciais de tratamento, onde os processos de floculação/coagulação são fundamentais e podem ser realizados de diferentes formas. Este tipo de processo tem capacidade de remover a turbidez da água superficial e converter a matéria orgânica dissolvida em materiais coloidais suspensos, os quais são mais facilmente removidos e facilitam a aplicação de tratamentos subsequentes (Al-Wasify; Hamed; Ragab, 2023).

Um dos fatores primordiais considerado em qualquer tratamento de água é o atendimento as legislações vigentes acerca dos parâmetros de potabilização de água para abastecimento público. No Brasil, as normas em relação aos parâmetros de potabilização de água para abastecimento público são definidas por meio das Portarias N° 05/2017 e N° 888/2021, ambas do Ministério da Saúde, as quais dispõem especialmente sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

2.2 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E DE POTABILIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO

As águas superficiais são as mais expostas as fontes de poluição, dessa forma o controle de qualidade é fundamental para garantir a segurança ambiental e consequentemente a saúde humana. As leis e regulamentos sobre a água funcionam como regras jurídicas para manter a qualidade da água, através da definição de limites para substâncias perigosas, compostos tóxicos e outras variáveis que oferecem riscos a qualidade da água. Ressalta-se que todo documento jurídico deve ser revisado periodicamente de forma que consiga contemplar as necessidades de crescimento populacional sem danos aos corpos hídricos, e ao meio ambiente em geral (Hairom *et al.*, 2021).

2.2.1 Padrões de qualidade das águas superficiais

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357 de 2005 classifica os corpos hídricos em cinco classes, as quais são definidas com base padrões de qualidade de água fundamentais para garantir o atendimento dos usos preponderantes, atuais ou futuros, conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Classes de qualidade de água e usos preponderantes.

Classe	Usos permitidos
Especial	Abastecimento para consumo humano, com desinfecção, preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
Classe 1	Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado, proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000, irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película e proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.
Classe 2	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional, proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274/2000, irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto e aquicultura e à atividade de pesca
Classe 3	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado, irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras, pesca amadora, recreação de contato secundário e dessedentação de animais.
Classe 4	Navegação e harmonia paisagística.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O enquadramento dos corpos hídricos é um dos instrumentos norteadores para a gestão dos corpos hídricos, visto que é baseado na condição atual e futura. Estudos de qualidade dos corpos hídricos são fundamentais tanto para compreensão dos possíveis danos existentes e passíveis de ocorrer, como para a garantia da qualidade da água de forma que seja suficiente para atender as necessidades da sociedade, incluindo o uso preponderante de abastecimento público de água (Von Sperling, 1996).

O corpo hídrico utilizado como fonte de água superficial desta pesquisa encontra-se localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí. Conforme o último enquadramento realizado, predominantemente os corpos hídricos da bacia hidrográfica apresentam boa qualidade, sendo compatíveis com Classe 1, exceto nas regiões próximas dos maiores centros urbanos (SEMA, 2012).

Ainda de acordo com a Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Rio Grande do Sul (SEMA, 2012), o abastecimento de água na bacia hidrográfica do Rio Ijuí é dividido entre atendimento pela Companhia de Saneamento do Rio Grande do Sul (CORSAN) (20 municípios) e atendimento pelos Departamentos Municipais de Água (16 municípios). A demanda de água na bacia hidrográfica é de aproximadamente 1.300 L s^{-1} , sendo 65% proveniente de fonte superficial.

2.2.2 Padrões de potabilidade da água de abastecimento

A manutenção da qualidade da água é um dos fatores fundamentais para garantir a segurança das águas servidas as populações, visto que a escolha do tipo de tratamento depende diretamente da qualidade da água. Ainda, o monitoramento da qualidade da água permite identificar e mitigar fontes de poluição. Em geral, a definição mais usual de qualidade da água é mensurada com base em valores máximos permitidos de parâmetros baseados em características física, química e biológicas da água (Omer, 2020).

Os principais parâmetros avaliados para definir a qualidade da água estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Alguns dos principais parâmetros relacionados a potabilidade da água.

Características físicas		
Parâmetro	Descrição	VMP⁽¹⁾
Temperatura	Indica a magnitude da energia cinética do movimento aleatório das moléculas.	VND
Cor aparente	Produzida pela reflexão da luz em partículas, denominadas coloides, dispersas de origem orgânica e diâmetro inferior a 10 µH.	15 uH
Turbidez	Medição da resistência da água à passagem de luz. Ocasiona especialmente pela presença de partículas flutuando na água.	5 UNT
Sólidos dissolvidos totais	Refere-se a quantidade de materiais particulado dissolvido na água	500 mg L ⁻¹
Sabor e Odor	Sua origem está associada a presença de diversas substâncias químicas ou gases dissolvidos, algumas das quais são utilizadas durante o próprio tratamento, como o cloro.	Intensidade 6
Condutividade Elétrica	Indica a capacidade da água de transmitir corrente elétrica em função da presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions.	VND
Características químicas		
Parâmetro	Descrição	VMP⁽¹⁾
pH	Consiste na concentração de íons H ⁺ nas águas e representa a intensidade de condições ácidas ou alcalinas.	6,0 a 9,0
Acidez	Característica química de neutralizar bases e variações bruscas de pH. Constitui-se principalmente de gases dissolvidos como CO ² e H ₂ S, ou ácidos húmicos, fúlvicos e himatomelânicos.	VND
Dureza	Indica a concentração de cátions multivalentes em solução na água, sobretudo Ca ⁺² e Mg ⁺² e também Al ⁺³ , Fe ⁺² , Mn ⁺² e Sr ⁺² .	300 mg L ⁻¹
Alcalinidade	Capacidade de neutralizar os ácidos e variações significativas de pH. Constitui-se principalmente de HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ⁻² e OH ⁻ .	VND
Salinidade	Característica relacionada a presença de sais minerais dissolvidos formados a partir de ânions, como cloreto, sulfato e bicarbonato e também cátions como cálcio, magnésio, potássio e sódio.	VND
Metais pesados	Inserem-se um amplo rol de elementos (cromo, cobre, mercúrio, magnésio, chumbo cádmio, zinco, cobalto, níquel, molibdênio e prata) passíveis de causar danos à saúde humana.	Anexo 9 da Portaria N° 888/2021 lista os VMP Continua

Agrotóxicos	Compostos orgânicos sintéticos utilizados como herbicidas, inseticidas, fungicidas e acaricidas extensivamente empregados no controle de pragas.	Continuação Anexo 7 da Portaria N° 888/2021 lista os VMP ⁽¹⁾ para agrotóxicos
Características Biológicas		
Parâmetro	Descrição	VMP⁽¹⁾
Bactérias coliformes	Bactérias do grupo <i>coliforme</i> costumam ser encontradas no trato intestinal de animais de sangue quente, servindo assim como indicativo de contaminação por fezes em amostras de água.	Ausência em 100 mL Conclusão

Nota: (1) Portarias N° 5/2017 e N° 888/2021; Alumínio (Al); Cálcio (Ca); Dióxido de Carbono (CO₂); Carbonato (CO₃); Ferro (Fe); Hidrogênio (H); Bicarbonato (HCO₃⁻); Magnésio (Mg); Manganês (Mn); Miligrama por Litro (mg L⁻¹); Mililitros (mL); Hidróxido (OH⁻); Estrôncio (Sr⁺²); Unidade de Hazen (µH); Unidade de Turbidez (uT); Valor Máximo Permitido (VMP); Valor Não Definido (VND).

Fonte: Elaborado com base em Libânio (2010).

De acordo com Richter (2009), o controle adequado dos parâmetros de potabilidade da água deve ser baseado em função das suas características físicas, químicas e biológicas e sua tratabilidade, minimizando possíveis prejuízos operacionais nos sistemas de tratamento.

Além disso, o controle de qualidade durante o tratamento permite não apenas a garantia da qualidade da água fornecida aos consumidores, mas também a observação de possíveis demandas de alterações estruturais nas ETA's. A implementação de tecnologias inteligentes, como gerenciamento de dados, criação de modelos com alta reprodutividade nas mais variadas condições, utilização de inteligência artificial e modelos de aprendizagem de máquina, é vista como uma alternativa potencial para contribuir no enfrentamento dos desafios nas ETA's, especialmente para a otimização dos sistemas (Lowe; Qin; Mao, 2022).

2.3 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUA

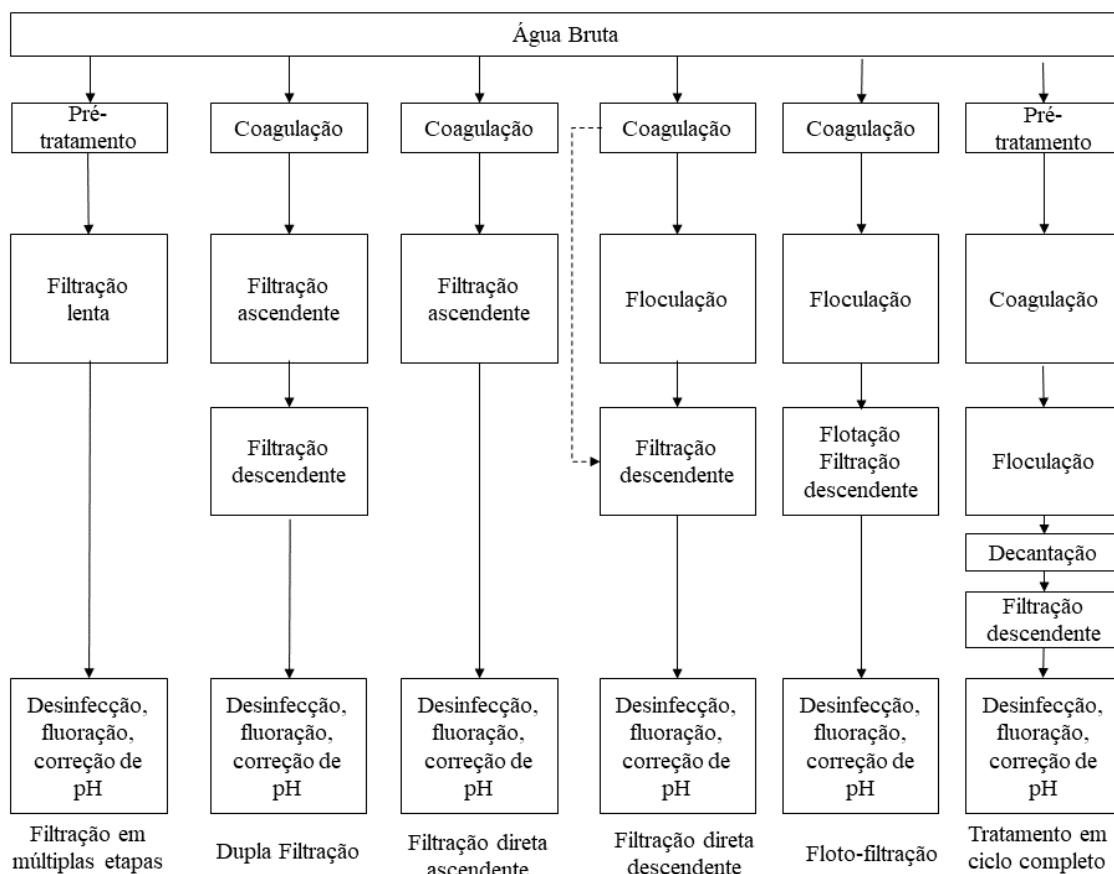
Os sistemas de tratamento de água podem ser divididos em três grandes grupos, sendo eles: sistemas simplificados, sistemas convencionais e sistemas avançados de tratamento. A definição do melhor sistema a ser empregado depende sobretudo da qualidade e origem da água bruta destinada a captação para tratamento. Em geral, cada sistema é subdividido em etapas de operações unitárias, as quais visam atingir o padrão de potabilidade exigido para toda água destinada ao consumo humano (Lima; Rollemberg, 2020).

Ainda de acordo com autores, os sistemas simplificados de tratamento de água são compostos essencialmente pelo processo de desinfecção, onde é realizada a cloração (adição de cloro) na água antes da distribuição à população, sendo que alguns sistemas contemplam o processo de fluoretação, onde é realizada a adição de flúor.

2.3.1 Sistemas Convencionais

Os sistemas convencionais de tratamento de água são subdivididos em três etapas fundamentais, a clarificação, a filtração e a desinfecção. Estas etapas tem como finalidade remover partículas suspensas ou dissolvidas, e microrganismos presentes na água bruta (Di Bernardo; Dantas, 2005). Os processos mais comumente utilizados no tratamento de água, podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 – Principais processos de tratamento de água para consumo humano.



Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005).

2.3.1.1 Clarificação

Na etapa de clarificação é realizada a coagulação/floculação seguida de sedimentação. Os flocos formados durante a coagulação/floculação são formados de partículas suspensas, coloidais, dissolvidas e contaminantes que afetam a cor, turbidez e sabor da água (Di Bernardo; Dantas, 2005).

Nos sistemas convencionais de tratamento de água a mais de 100 anos, a coagulação é um processo destinado a remoção de partículas suspensas e dissolvidas através da desestabilização da solução devido a inserção de um agente coagulante. Os coagulantes propiciam a aglutinação das partículas, formando os denominados flocos, que posteriormente são facilmente removidos por processos de sedimentação e/ou filtração (Jiang, 2015).

A coagulação pode ocorrer essencialmente por meio de dois mecanismos ou a combinação destes, sendo os mecanismos de adsorção/neutralização de cargas e varredura. Em sua concepção geral o mecanismo de varredura é utilizado em sistemas de tratamento de ciclo completo, ou seja, aqueles que incluem as etapas de tratamento de coagulação, floculação, decantação e filtração. No mecanismo de varredura, os flocos formados devem possuir a características de alta densidade, para que ocorra sua deposição, pelo contrário durante o mecanismo de adsorção/neutralização não há necessidade de formação de grandes flocos, mas apenas a desestabilização da solução (Richter, 2009).

Para garantir a eficiência da coagulação, independente do mecanismo, é necessário que vários fatores interferentes sejam considerados, incluindo dosagem de coagulante, condições de mistura, pH, temperatura, características das partículas (tamanho, funcionalidade, carga e hidrofobicidade), bem como a concentração dos poluentes na água bruta. Em geral, considerando os fatores interferentes, os coagulantes mais empregados são os a base de alumínio e ferro, devido a sua consolidada aplicação, comumente eficiência econômica e versatilidade (Matilainen; Vepsäläinen; Sillanpää, 2010).

Apesar de consolidados, o uso de coagulantes químicos tem levantado uma série de preocupação em relação ao seu uso no tratamento de água, especialmente pelo grande volume de lodo gerado, altos custos, formação de subprodutos, controle da dosagem de coagulante, temperatura e aumento na corrosividade devido ao tipo de coagulante. Além disso, estudos indicam que o alumínio residual na água tratada pode ocasionar riscos de toxicidade para plantas, animais e seres humanos, como a doença de *Alzheimer* (Dayarathne *et al.*, 2021).

Neste contexto, nos últimos anos tem-se observado uma crescente procura por alternativas mais sustentáveis no tratamento de água e efluentes. Uma das práticas mais usuais

e promissoras é a substituição de produtos químicos, comumente empregados, por produtos “verdes”, ou seja, produtos capazes de causar a mesma eficiência de tratamento, porém com menos impactos ambientais. No tocante aos coagulantes empregados no tratamento de água, a substituição dos químicos por produtos orgânicos de origem natural tem sido vista como uma alternativa benéfica e de fácil aplicação (Ang; Mohammad, 2020).

O maior uso de coagulantes de origem natural diz respeito aos polímeros orgânicos, especialmente pela capacidade de redução da dosagem de coagulante, menor volume de lodo gerado e menor sensibilidade ao pH da água bruta. Estudos demonstram que quando comparados com coagulantes metálicos o uso de polímeros orgânicos como coagulantes propicia a redução dos custos gerais de operação em até 30% (Sillanpaa *et al.*, 2018).

Em um estudo desenvolvido por Oliveira, Trevisan e Skoronski (2022), os autores buscaram avaliar o desempenho de um coagulante natural a base de tanino para a clarificação da água potável de um rio de alta turbidez. Os testes avaliaram não apenas a remoção da turbidez e cor, mas também o consumo de alcalinidade, a dosagem ideal e a velocidade de sedimentação. Neste estudo, os resultados indicaram uma redução de turbidez de aproximadamente 96,40% ($26,1 \pm 56,1 - 0,94 \pm 0,26$ UNT) e de 97,93% ($145 \pm 190 - 3 \pm 3$ Pt-Co) de redução de cor aparente, sem variações de pH e com boa velocidade de sedimentação, cerca de $3,5 \text{ cm min}^{-1}$. Os resultados deste estudo evidenciam a capacidade de tratamento dos coagulantes orgânicos, indicando um futuro mais sustentável na etapa de coagulação durante o tratamento de água.

2.3.1.2 Filtração

Considerando os sistemas convencionais de tratamento de água, a filtração é aplicada sequencialmente após o processo de clarificação, sendo um processo fundamental para garantir a qualidade da água para o consumo humano. Utilizados a mais de um século, os sistemas de tratamento de água por filtração constituem o centro da potabilização de água. A filtração consiste na remoção, principalmente por ação física, dos sólidos suspensos e dissolvidos presentes à medida que a solução aquosa flui pelo leito filtrante. A filtração pode apresentar diversos meios filtrantes, formas de filtração e utilizações, entretanto a sua principal finalidade é a remoção de turbidez, cor, microrganismos e partículas suspensas e dissolvidas presentes na água ou formadas durante o processo de pré-tratamento (Cescon; Jiang, 2020).

De acordo com Di Bernardo (1993), diversos fatores são determinantes para garantir um bom funcionamento do processo de filtração, sendo um dos mais importantes a escolha adequada do meio filtrante. A escolha do material deve levar em consideração as características

da água bruta (origem, tamanho e massa específica das partículas, resistência das partículas às forças de cisalhamento, temperatura da água, concentração, pH), do meio filtrante (granulometria, tamanho efetivo, coeficiente de uniformidade) e também características hidráulicas (taxa de aplicação superficial, perda de carga, vazão de saída).

Os sistemas de filtração costumam ser amplamente empregados em ETA não apenas por sua eficiência, mas especialmente pelo baixo custo de implantação, operação e manutenção. Em geral, o custo associado ao sistema de filtração depende do material escolhido como meio filtrante, a areia compõe o material mais amplamente utilizado. Ainda, alguns sistemas utilizam filtros de antracito, carvão ativado, zeólitas, ou a combinação destes com outro material (Ghisi, 2019).

No Brasil, a ABNT NBR n° 12.216:1992 orienta acerca das condicionantes para construção de ETA destinada à produção de água potável para abastecimento público. Esta norma subdivide os filtros de areia em dois de acordo com as características do material filtrante e da água bruta, sendo eles: filtros lentos e filtros rápidos/diretos. Na Tabela 1 estão apresentadas as principais diferenças entre os dois tipos de filtros, de acordo com a norma.

Tabela 1 – Principais diferenças entre os filtros lentos e rápidos/diretos de acordo com a ABNT NBR N° 12.216/1992.

Característica da água bruta	Filtros lentos	Filtros rápidos/diretos
	Turbidez ≤ 40 UNT; Cor aparente ≤ 20 uH	Grandes concentrações de partículas em suspensão
Camada filtrante		
Espessura	0,90 m	25cm
Tamanho efetivo	0,25 a 0,35 mm	0,40 a 0,45 mm
Coeficiente de uniformidade	menor que 3	1,4 a 1,6
Camada suporte		
Espessura	≥ 20 cm	≥ 25 cm
Seixos	Granulometria decrescente no sentido ascendente	Granulometria decrescente no sentido ascendente

Fonte: Elaborado pela autora de acordo com a ABNT NBR n° 12.216:1992.

O tipo de filtração utilizada irá depender de diversas variáveis, as quais devem ser previamente analisadas. Habitualmente a filtração lenta é utilizada para o tratamento de pequenos volumes, devido à baixa taxa de aplicação superficial ($\leq 6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Uma característica marcante da filtração rápida/direta é a necessidade de um tratamento prévio de

coagulação da água bruta para potencializar a remoção de sólidos presentes na água, com grande potencial para funcionamento em águas brutas com características de turbidez entre 50 e 60 UNT (Richter, 2009) (Heller; Pádua, 2010).

Ao longo dos anos a aplicação de filtros rápidos de areia tem sido favorecida em relação aos filtros lentos, especialmente devido a menor área que demandam, sua alta taxa de filtração e eficiência, que permite o tratamento de volumes maiores de água durante o período de operação (Gray, 2010).

2.3.1.2.1 Filtração rápida no tratamento de água potável

A filtração rápida ou direta é o processo empregado para remoção de impurezas da água bruta sem que haja necessidade de unidades prévias de tratamento, como as unidades de sedimentação/decantação. Neste tipo de sistema, que pode operar de forma descendente ou ascendente, a água coagulada é inserida diretamente no meio filtrante (Richter, 2009).

Os filtros rápidos surgiram diante da dificuldade de realizar o tratamento em estações de ciclo completo de águas brutas com cor e turbidez relativamente baixas. Dessa forma, os filtros rápidos foram propostos para otimizar o tratamento de águas brutas pouco carregadas, empregando a coagulação pelo mecanismo de adsorção/neutralização de cargas (Di Bernardo; Dantas, 2005).

Quando empregado o mecanismo de adsorção/neutralização de cargas, as partículas são fortemente desestabilizadas, sem necessidade da formação de grandes flocos para remoção nos filtros. Assim, as dosagens de coagulante costumam ser menores, outra vantagem é a ausência das unidades de decantação, reduzindo cerca de 50% a área necessária para construção da ETA e, em até 70% a redução de lodo (Santos *et al.*, 2007).

As recomendações gerias para o melhor emprego da filtração rápida listam características da água bruta que são fundamentais, como: turbidez inferior a 50 UNT, cor inferior a 25 uH, contagem de algas diatomáceas inferior a 1.000 UPA mL⁻¹ e índice bacteriológico não superior a 90 NMP 100 mL⁻¹ (Richter, 2009). Quanto as recomendações para a operacionalização dos filtros rápidos, estas são focadas na qualidade da água bruta, coagulação, sistema de mistura rápida e tempo de agitação, existência ou não de unidade de floculação, método de operação (taxa constante ou declinante), eficiência da lavagem e monitoramento (Di Bernardo; Dantas, 2005).

Um fator determinante para a garantia do funcionamento dos filtros rápidos é a adequação dos sistemas de lavagem. Uma técnica reconhecida por sua eficiência na limpeza

dos filtros rápidos é a retrolavagem, a mesma costuma ser empregada em três situações, sendo: quando a perda de carga do filtro excede um valor previamente determinado, quando a turbidez da água tratada exceder 1,0 UNT do valor aceitável para água potável e/ou quando o filtro atinge o tempo de operação máximo definido para limpeza. Na retrolavagem uma parcela de água ou ar são bombeados por meio de bocais perfurados (comercialmente conhecidos como crepinas) reversamente ao fluxo de filtração do filtro, promovendo a fluidização do meio e desprendimento das partículas (Beshr *et al.*, 2023).

O emprego de acessórios adequados na saída dos filtros, como as crepinas, pode ser considerado importante, pois seu uso impede a turbulência inadequada do meio filtrante durante a retrolavagem, movimentação indesejada de partículas, formação de canais preferenciais, e especialmente entupimentos que aceleram o processo de perda da carga durante o processo de filtração, diminuindo a carreira de filtração (Santos; Mesquita; Testezlaf, 2013).

A aplicação de filtros rápidos tem crescido e impulsionado pesquisas em diferentes aplicações, especialmente para sistemas descentralizados de abastecimento público de água potável. Um estudo desenvolvido por García-Ávila *et al.* (2024) investigou a aplicação de filtros rápidos em múltiplos estágios como estratégia para abastecimento de água potável em áreas rurais. Para isso, cinco colunas de Policloreto de Vinila (PVC) com diâmetro de 110 mm e 2m de altura foram aplicadas sequencialmente. Os meios filtrantes investigados foram cascalho, quartzo, areia grossa, areia fina e antracito, sendo os testes divididos em filtração com e sem aplicação de coagulação prévia. Os resultados indicaram a coagulação impacta diretamente no número de carreiras necessárias (cinco) para atingir o valor desejável de turbidez (5 UNT). Além disso, a aplicação de altas taxas de filtração ($330 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) possibilitou o tratamento da água bruta com alta turbidez utilizando apenas duas colunas (cascalho e quartzo). Dessa forma, os filtros rápidos emergem como uma alternativa potencial e eficaz para o tratamento de água em comunidades sem acesso a sistemas de tratamento convencionais.

2.3.1.2.2 Filtros rápidos de camada dupla para o tratamento de água potável

Os filtros rápidos podem ser formados por camadas simples (areia) ou duplas (areia e antracito), com operações em fluxo ascendente ou descendente. Ressalta-se que para composição do leito filtrante de dupla camada é importante considerar os critérios da ABNT NBR n° 12.216:1992, a qual estabelece que a camada filtrante dupla deve ser constituída por camadas sobrepostas de areia e antracito, considerando a espessura e granulometria determinadas em ensaios pilotos. Em caso de não realização dos ensaios adota-se uma camada

de areia de 25 cm com tamanho efetivo de 0,4 a 0,45 mm e coeficiente de uniformidade de 1,4 a 1,6, enquanto que, para o antracito adota-se uma camada de 45 cm com tamanho efetivo dos grãos de 0,8 a 1,0 mm e coeficiente de uniformidade $\leq 1,4$.

A aplicação dos filtros rápidos vem sendo aprimorada com a utilização de novas configurações de leitos, meios filtrantes e suas combinações. Os filtros rápidos de areia combinados com carvão ativado, também chamados de filtros de camada dupla, têm despertado interesse em pesquisadores devido a capacidade de adsorção aprimorada do material. Além disso, a combinação potencializa a eficiência de remoção de diversos tipos de poluentes relatados, resultado ainda mais promissor quando combinados com outra tecnologia preliminar. O uso de CAG em conjunto com filtros rápidos de areia pode empregados em filtros seriais, duplos ou sanduíche (Li *et al.*, 2022).

Uma pesquisa desenvolvida por Ma, Arnold e Hozalski (2018) explorou um filtro de areia-CAG e areia-antracito em escala piloto sob diferentes taxas de carga hidráulica para remoção de compostos emergentes ao longo de 15 meses. Os resultados indicaram uma remoção superior (entre 49,1 e 94,4%) dos compostos analisados na combinação de filtros de areia-CAG, encorajando a continuidade de pesquisas. Além disso, a análise de regressão indicou que as taxas de biodegradação, hidráulica, concentração de contaminantes, taxas de transferência e concentração de carbono orgânicos dissolvido são parâmetros decisivos para o desempenho destes filtros.

2.3.2 Sistemas Avançados

Apesar de completos e eficientes para águas brutas pouco contaminadas, os sistemas de tratamento convencionais de água são considerados pouco eficientes para remoção de contaminantes como agrotóxicos fármacos, nanopartículas, hormônios, plastificantes e outros compostos, tal fato se deve pelo pequeno tamanho molecular, alta solubilidade e persistência destes contaminantes. Assim, alternativas de tratamento que contemplem a remoção destes contaminantes são cada vez mais alvo de pesquisas. Essas tecnologias incluem métodos de oxidação física, biológica e química, os conhecidos sistemas de tratamento avançado de água (Li *et al.*, 2023).

Diante da crescente detecção de contaminantes persistentes na água evidencia a necessidade de diversificação nos sistemas de tratamento e abastecimento de água potável, ultrapassando as barreiras do tratamento convencional. Os sistemas avançados de tratamento de água visam o emprego de tecnologias capazes de elevar o nível do tratamento convencional,

com a utilização de sistemas mais refinados. No geral, os sistemas avançados podem ser usados em qualquer etapa do tratamento, desde a etapa primária, substituindo um processo de coagulação/floculação, até mesmo nas etapas finais de polimento da água tratada. Os principais tratamentos avançados empregados em estações de tratamento de água são a adsorção por carvão ativado, filtração por membrana, ozônio, desinfecção ultravioleta, biofiltração ou uma combinação destes e outros processos (Teodosiu *et al.*, 2018).

Amplamente utilizado no tratamento de água, o processo de adsorção consiste em um fenômeno físico-químico baseado no acúmulo de uma substância presente na fase fluida em uma superfície de fase sólida. O processo de adsorção depende de vários fatores, como tipo do material adsorvente e capacidade de reter o adsorvato, pH, temperatura, concentração do adsorvato e também de condições operacionais (Costa *et al.*, 2022).

A adsorção para tratamento de água apresenta diversas vantagens, como: baixo custo, alta eficiência, facilidade de operação, facilidade de implementação, possibilidade de utilização de diversos adsorventes e possibilidade de recuperação do adsorvente e adsorvato. Diversos materiais podem ser empregados no processo de adsorção, dentre os quais destacam-se as zeólitas, as resinas de troca iônica e o carvão ativado (Dotto; McKay, 2020).

Embora o carvão ativado em pó (CAP) apresente grande capacidade de tratamento por conta da sua maior área superficial, o seu uso em grandes sistemas de tratamento de água se torna limitante por conta do custo de aplicação aliado ao descarte e perdas de material. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos indica o uso de carvão ativado granular (CAG) em estações de tratamento de água, especialmente pela alta capacidade na remoção de compostos que produzem sabor e odor, matéria orgânica natural, compostos orgânicos e inorgânicos, de forma que as perdas de material são minimizadas em sistemas de fluxo contínuo (USEPA, 2017). O crescimento das pesquisas utilizando carvão ativado, especialmente o granular, podem ser observados no Quadro 3, onde a utilização tem sido destacada para uma ampla variedade de contaminantes e matrizes aquosas diferentes, evidenciando sua versatilidade e eficiência.

Quadro 3- Estudos recentes utilizando carvão ativado na aplicabilidade do tratamento de água.

Estudo	Objetivo	Principais resultados	Referência
Efficiency of home water filters on pesticide removal from drinking water	Investigação da capacidade de remoção de 13 pesticidas em concentração ambiental da água da torneira contaminada através de diferentes filtros, sendo: quatro filtros de membrana, um filtro de carvão ativado, radiação ultravioleta, osmose reversa, resinas de troca iônica e ozonização.	Os maiores desempenhos foram observados para o carvão ativado e a osmose reversa, atingindo 100% de remoção dos pesticidas. Para os filtros de membrana, identificou-se uma baixa eficiência e, portanto, de forma que sua utilização se torna inviável para essa finalidade.	https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122936
Advanced drinking water production by 1 kDa hollow fiber nanofiltration – Biological activated carbon filtration (HFNF – BACF) enhances biological stability and reduces micropollutant levels compared with conventional surface water treatment	Investigação da qualidade da água potável produzida através de um novo tratamento avançado com nanofiltração de fibra oca de 1 kDa – Filtração Biológica de Carvão Ativado de água superficial, bem como a comparação com um pré-tratamento convencional de coagulação – floculação – sedimentação – filtração de meio – desinfecção UV.	Os resultados indicaram que o tratamento por filtração biológica de carvão ativado atingiu um nível alto de estabilidade biológica como água potável. Ainda foi possível identificar a que a remoção média de micropoluentes orgânicos foi maior do que o tratamento convencional (37%), bem como um melhor desempenho para redução de turbidez, partículas e na maioria dos metais traço.	https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138049

Continua

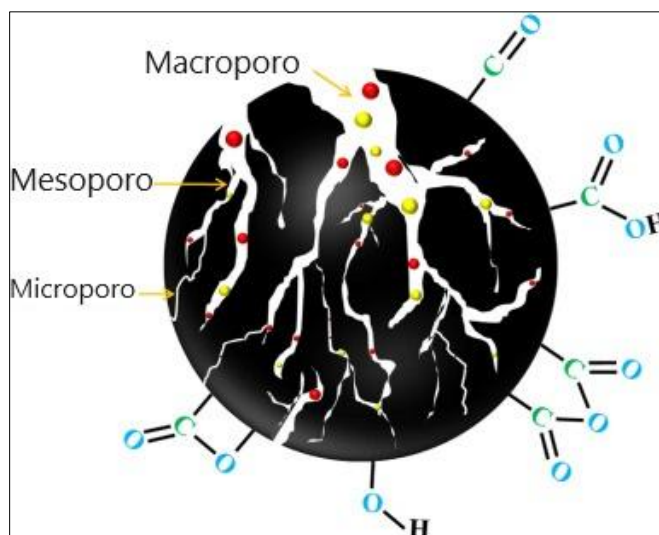
Adapting direct filtration to increasing source water dissolved organic carbon using clarification and granular activated carbon	Investigação do uso de CAG como alternativa em sistemas de filtragem direta constantemente submetidas a mudanças na qualidade da água devido ao aumento nas concentrações de matéria orgânica natural.	A adaptação de CAG indicou-se como uma estratégia promissora para remoção de carbono orgânico dissolvido (aproximadamente 60%) e uma redução significativa no potencial de formação de subprodutos de desinfecção	Continuação https://doi.org/10.1002/aws2.1352
Efficient Mn(II) removal by biological granular activated carbon filtration	Investigação da eficiência do CAG em condições variadas para remoção de Manganês da água.	Os resultados indicaram um alto potencial, 400 µg L ⁻¹ para 10 µg L ⁻¹ , das colunas de CAG para redução de manganês da água em um curto período de amadurecimento do filtro, resultados esses que sobressaem a eficiência dos filtros de areia que não indicaram remoção eficiente de manganês.	https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131877
Removal of the waterborne parasite <i>Cryptosporidium parvum</i> from drinking water using granular activated carbon	Avaliação do desempenho do CAG na remoção das formas infecciosas de <i>Cryptosporidium parvum</i> (oocistos) da água potável.	Os resultados indicaram altas eficiências do GAC na remoção <i>C. parvum</i> , especialmente com uma altura de leito de 50 cm, onde maior redução logarítmica foi atingida (3,47 ± 0,31). O estudo ainda indicou que os filtros de GAC possuem grande potencial como barreiras adicionais contra esse enteropatógeno transmitido pela água na água potável.	https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111185 Conclusão

Fonte: Autora, (2024).

2.3.2.1 Carvão ativado granular no tratamento de água potável

Diversos materiais podem ser empregados como adsorventes no tratamento de água potável, um dos mais usuais é o carvão ativado. O carvão ativado consiste em uma substância carbonácea produzida a partir de materiais ricos em carbono, como madeira, carvão, turba, casca de coco e outros. O carvão ativado pode ser classificado em três tipos, sendo: em pó, granular e peletizado, classificação essa que segue o formato e tamanho do material. A área superficial de adsorção do carvão ativado costuma variar de 500 a 3.000 m² g⁻¹, e é dividida em microporos, mesoporos e macroporos (Sultana *et al.*, 2022), conforme representado na Figura 2.

Figura 2 – Representação esquemática dos poros e grupos funcionais do carvão ativado.



Fonte: Adaptado de Sultana *et al.* (2022).

O carvão ativado é um material empregado comumente em sistemas avançados de tratamento de água, devido a capacidade de adsorver uma ampla gama de contaminantes. Assim como outros materiais adsorventes, a adsorção por carvão ativado depende das características do adsorvente (em pó ou granular), das condições da água bruta e também das características dos adsorvatos. Devido a adsorção ser um processo relacionado com o contato entre a superfície do adsorvente e o adsorvato, a seleção do material apropriado para utilização em sistemas avançados de tratamento de água está diretamente relacionada com a distribuição do tamanho dos poros e características da superfície, onde alguns materiais podem apresentar limitações (Schumann *et al.*, 2023).

No CAG a remoção dos contaminantes ocorre de três formas, sendo elas: adsorção na superfície externa do material, filtração física dos contaminantes particulados e biodegradação do componente biodegradável quando ocorre a formação de um biofilme no CAG, sendo que a última ocorre apenas em taxas de aplicação superficial baixas. O alto desempenho do CAG está relacionado com a sua área superficial interna ser altamente desenvolvida, boa porosidade e grande capacidade de adsorção para diversos contaminantes em variadas concentrações (Yuan; Passeport; Hofmann, 2022).

Um estudo desenvolvido por Arenas *et al.* (2021) investigou a eficiência de adsorção e remoção de nanoplásticos por CAG em duas matrizes de água, sendo água ultrapura fortificada com nanoplásticos e água superficial utilizada para abastecimento público. Os resultados foram promissores para as duas matrizes de água, entretanto os melhores resultados foram obtidos para a água superficial, com uma capacidade máxima de adsorção de 6,33 mg/g. Além disto, verificou-se que a capacidade de adsorção aumentou de acordo com o aumento na concentração dos nanoplásticos.

Outra investigação da aplicação do CAG é para remoção de parasitas que possam estar presentes em águas de abastecimento, especialmente através da filtração. A remoção do parasita *Cryptosporidium parvum* com CAG da água potável foi investigada por Couso-Pérez *et al.* (2023), para isto uma água subterrânea foi coletada e enriquecida com oocistos de *Cryptosporidium parvum*, o processo de tratamento se deu pela passagem da água em diferentes alturas de leito (5 - 50cm). A maior redução logarítmica foi observada para o leito de 50 cm de altura, onde uma remoção notável dos oocistos foi identificada.

Em relação a qualidade da água potável, a ocorrência de agrotóxicos na água de abastecimento tem levantado uma série de preocupações, especialmente devido aos seus efeitos adversos a saúde humana. O desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias para controle e remoção dos agrotóxicos na água de abastecimento público emergem indispensavelmente para redução dos impactos à saúde humana pela exposição aos agrotóxicos (Syafrudin *et al.*, 2021).

Assim, um estudo desenvolvido por Alves *et al.* (2018) avaliou a eficiência do processo de adsorção em leito fixo de CAG para remoção de agrotóxicos carbamatos carbaril, metomil e carbofurano em águas de abastecimento público. Os resultados foram promissores para remoção destes agrotóxicos pelo sistema estudado, atingindo eficiência de até 100% para os carbamatos. Além disto, o sistema possibilitou a redução da cor aparente e turbidez, demonstrando a eficiência no processo de tratamento de água de abastecimento para remoção de diferentes parâmetros avaliados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item encontram-se descritos os materiais, os equipamentos e métodos empregados para as análises, bem como a descrição de todos os testes experimentais realizados nas dependências do Laboratório de Águas e Ecotoxicologia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS)- *campus* Cerro Largo, Rio Grande do Sul, Brasil.

3.1 ÁREA E ÁGUA DE ESTUDO

A área de estudo contempla o município de Cerro Largo, localizado no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, com uma área territorial de 176,643 km². O município possui aproximadamente 13.705 habitantes, sendo que deste total aproximadamente 20% vivem em áreas rurais (IBGE, 2022).

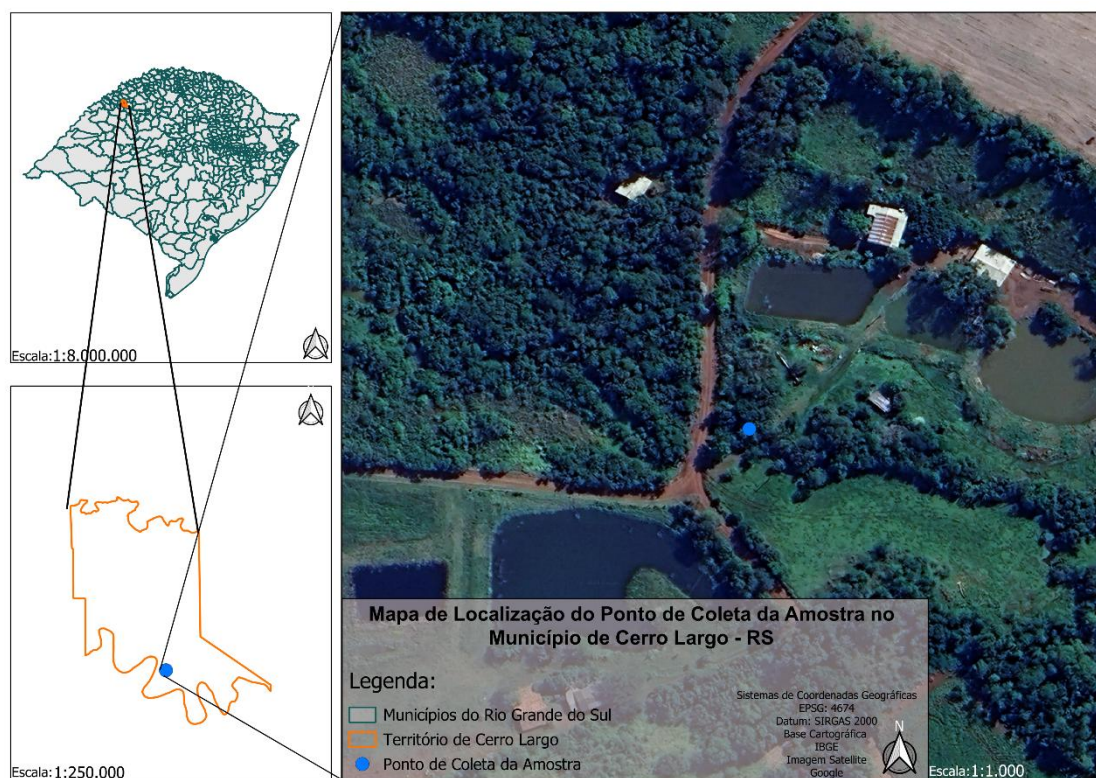
A economia do município é fortemente relacionada a agricultura e a pecuária, e em menor proporção, a indústria. Na pecuária destacam-se as atividades de criação de bovinos e suínos, e na agricultura os principais cultivos contemplam as culturas de soja, trigo e milho. Na indústria o beneficiamento de produtos primários é a principal atividade desenvolvida (PMSB, 2022).

No que se refere ao abastecimento público de água, atualmente o mesmo é feito por fonte exclusivamente subterrânea, submetido apenas ao processo de desinfecção por cloro. A captação da água é feita através de 34 poços registrados, sendo de responsabilidade compartilhada entre a Prefeitura Municipal e a Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) (Silveira, 2019).

Para fins de delimitação da água utilizada para a pesquisa, elencou-se como critérios de seleção: i) Ser água superficial localizada em comunidade rural do Município de Cerro Largo/RS; ii) Estar em divergência com os padrões de potabilidade descritos nas Portarias MS N° 5/2017 e N° 888/2021; iii) O local de coleta possuir sistema de captação ou acesso implantado para algum fim, como irrigação ou dessedentação animal.

A partir dos critérios definidos, a coleta de água superficial foi realizada na Linha Taquarussu, comunidade rural do município de Cerro Largo/RS com área aproximada de 10,02 km² e localizada em sua maior parte as margens do Rio Ijuí (Figura 3).

Figura 3 – Mapa de localização do ponto de coleta da água superficial.



Fonte: Autora, (2024)

O corpo hídrico selecionado para coleta possui aproximadamente 5 m de largura, com uma profundidade de aproximadamente 0,5m em períodos normais. Dentro da propriedade em que se encontra localizado o mesmo é empregado para dessedentação animal, possuindo pouca área de proteção permanente em suas margens neste trecho.

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DA ÁGUA SUPERFICIAL

Para caracterização físico-química e microbiológica da água superficial alguns parâmetros foram definidos previamente com base nas Portaria MS N° 5/2017 e N° 888/2021. Os parâmetros analisados, bem como equipamentos ou metodologias empregados podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2- Parâmetros de caracterização da água superficial bruta.

Parâmetro (unidade)	Unidade	Método	Equipamento
Cor Aparente (uH)	uH	2120 E (APHA, 2012)	Condutivímetro DM-32 (Digimed)
Turbidez	UNT	2130 B (APHA, 2012)	Turbidímetro DM-TU (Digimed)
pH		4500 (APHA, 2012)	pHmetro mPA210 (MS TECNOPON)
Condutividade Elétrica	$\mu\text{S cm}^{-1}$	2510 B (APHA, 2012)	Condutivímetro DM-32 (Digimed)
Coliformes totais	ausência em 100mL	SM 9221 D (APHA, 2012)	Kit COLItest ®
<i>Escherichia Coli</i>	ausência em 100mL	SM 9221 F (APHA, 2012)	Kit COLItest ®

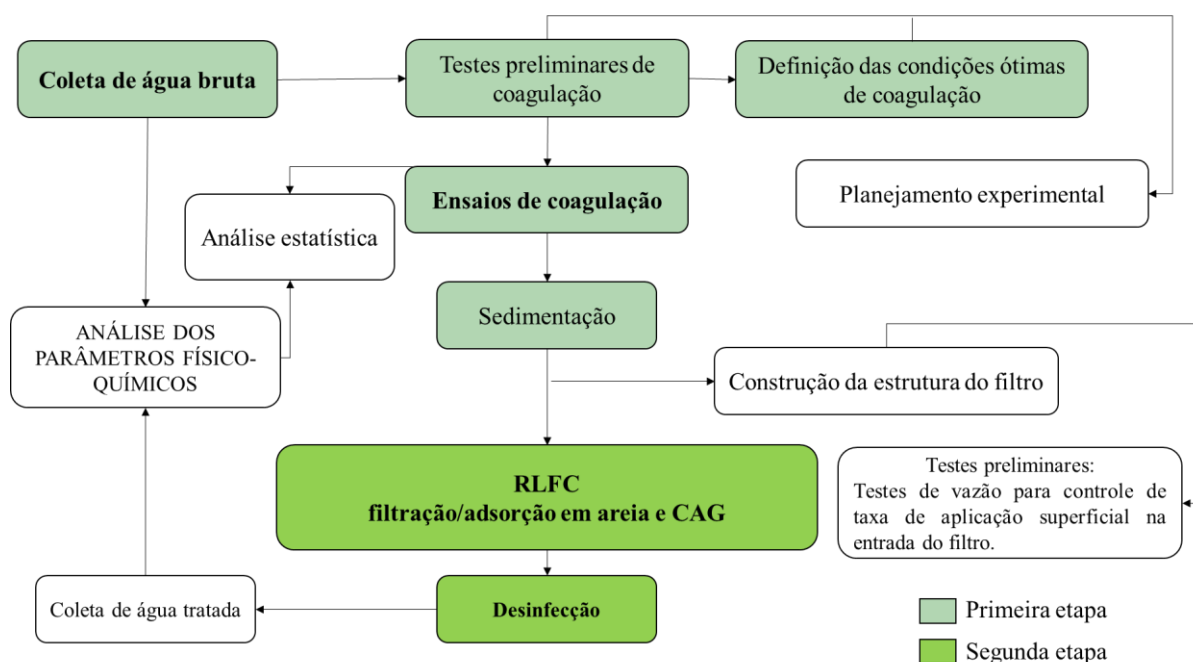
Nota: American Public Health Association (APHA)

Fonte: Autora, (2024).

3.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O procedimento metodológico foi baseado em pré-testes realizados em todas as etapas de planejamento. Na Figura 4 é exposto o fluxograma de planejamento e operacionalização do sistema adotado.

Figura 4 - Fluxograma de trabalho adotado durante os testes.



Fonte: Autora (2024).

A realização dos testes foi dividida em duas etapas principais divididas em pequenas subetapas. Sendo a primeira compreendida pela clarificação da água bruta, contemplando a coleta de água superficial e testes preliminares de coagulação, fundamentais para compreensão do processo e otimização das condições operacionais aplicadas.

Ainda a primeira etapa contemplou a aplicação das condições otimizadas de coagulação a todo volume de água superficial coletada anteriormente, a qual manteve-se armazenada em condições adequadas para manter suas características originais até a realização dos testes. Após aplicação da coagulação, sedimentação e separação do volume tratado, a água foi armazenada em reservatórios para posterior abastecimento do filtro estudado.

A segunda e principal etapa contemplou a filtração rápida em dupla camada filtrante no reator de leito fixo contínuo. Para a composição das camadas filtrantes/adsorvente utilizou-se a areia de quartzo e o carvão ativado granular precedidos de uma camada suporte formada por seixos rolados em diferentes granulometrias. Nesta foram fixados parâmetros hidráulicos previamente definidos com base nas recomendações da ABNT NBR nº 12.216:1992.

Ainda, para finalização desta etapa aplicou-se a desinfecção final da água tratada, para tal foi instalado na saída do filtro um dosador de cloro. A operação compreendeu o ciclo completo de potabilização de água, contemplando as etapas de clarificação, filtração e desinfecção.

3.3.1 Planejamento experimental

Para definir as melhores condições operacionais da etapa de clarificação utilizou-se um planejamento experimental. Para verificação do comportamento inicial do coagulante utilizado e forma de agitação realizaram-se pré-testes baseados em condições estabelecidas pelo fabricante. Os pré-testes foram fundamentais para definição da faixa limite de estudo, e também para compreensão das variáveis de maior impacto.

Para o planejamento experimental foi utilizado um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) (RODRIGUES; LEMMA, 2009). Neste, foi investigada a significância a 95% de confiança (p -valor $< 0,05$) de três variáveis independentes: dosagem de coagulante (ml L^{-1}), velocidade de agitação (RPM) e tempo de contato (min). O planejamento fatorial completo utilizado 2^3 , incluiu oito pontos fatoriais, seis pontos axiais e três repetições do ponto central, totalizando 17 ensaios. Na Tabela 3 está representada a matriz do delineamento experimental.

Os valores dos pontos fatoriais (-1 e 1) indicam o valor mínimo e máximo investigado para cada variável, o ponto central (0) fornece uma estimativa de erro, os pontos axiais (-1,68 e 1,68) determinam os níveis extremos para cada variável.

Tabela 3 – Matriz do delineamento experimental.

		Valores codificados			Valores reais		
	Ensaio	X ₁	X ₂	X ₃	Dosagem (mL L ⁻¹)	Velocidade de agitação (RPM)	Tempo de contato (min)
Pontos Fatoriais	1	1	-1	-1	1,3	210	5
	2	1	1	1	1,3	280	15
	3	1	-1	1	1,3	210	15
	4	-1	-1	1	0,35	210	15
	5	1	1	-1	1,30	280	5
	6	-1	1	1	0,35	280	15
	7	-1	1	-1	0,35	280	5
	8	-1	-1	-1	0,35	210	5
Pontos Centrais	9	0	0	0	0,83	245	10
	10	0	0	0	0,83	245	10
	11	0	0	0	0,83	245	10
Pontos Axiais	12	0	0	1,68	0,83	245	18
	13	-1,68	0	0	0,035	245	10
	14	0	1,68	0	0,83	303	10
	15	1,68	0	0	1,62	245	10
	16	0	-1,68	0	0,83	186	10
	17	0	0	-1,68	0,83	245	1,6

Nota: (X₁) dosagem de coagulante; (X₂) velocidade de agitação; (X₃) tempo de contato.

Fonte: Autora, (2024).

A eficiência da coagulação foi baseada na remoção dos parâmetros cor aparente e turbidez. A Equação 1, fornece o modelo geral para remoção, em que X_i e X_i^2 são variáveis codificadas e β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij} são os parâmetros do modelo de regressão e ε representa o erro experimental.

$$\% \text{ Remoção} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_2 x_2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (1)$$

3.3.1.1 Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos a análise estatística, para tal foram utilizados os programas Microsoft Excel 2021 e *Statistica*® 11. Os resultados das análises obtidas a partir do DCCR foram avaliados por meio de Análise de Variância (ANOVA) a 95% de confiança.

Com base na análise estatística as variáveis independentes foram otimizadas com base na Desejabilidade Global. A Desejabilidade Global permite o ajuste simultâneo das variáveis independentes, com base nos desempenhos individuais, de forma a maximizar o desempenho ideal do processo como um todo (Derringer; Suich, 1980).

Assim, a transformação de cada resposta individual em uma escala adimensional de desejabilidades individuais (d_i), possibilita que a desejabilidade individual possa variar de: 0 para uma resposta inaceitável, até 1 para a resposta desejada. Com base na média geométrica das desejabilidades individuais é possível obter a desejabilidade global (D), conforme Equação 2.

$$D = \sqrt[m]{d_1 d_2 \dots d_m} \quad (2)$$

Em que: m é o número de respostas avaliadas. Dessa forma, o processo de otimização simultânea é reduzido a maximização dos níveis de cada variável. Assim:

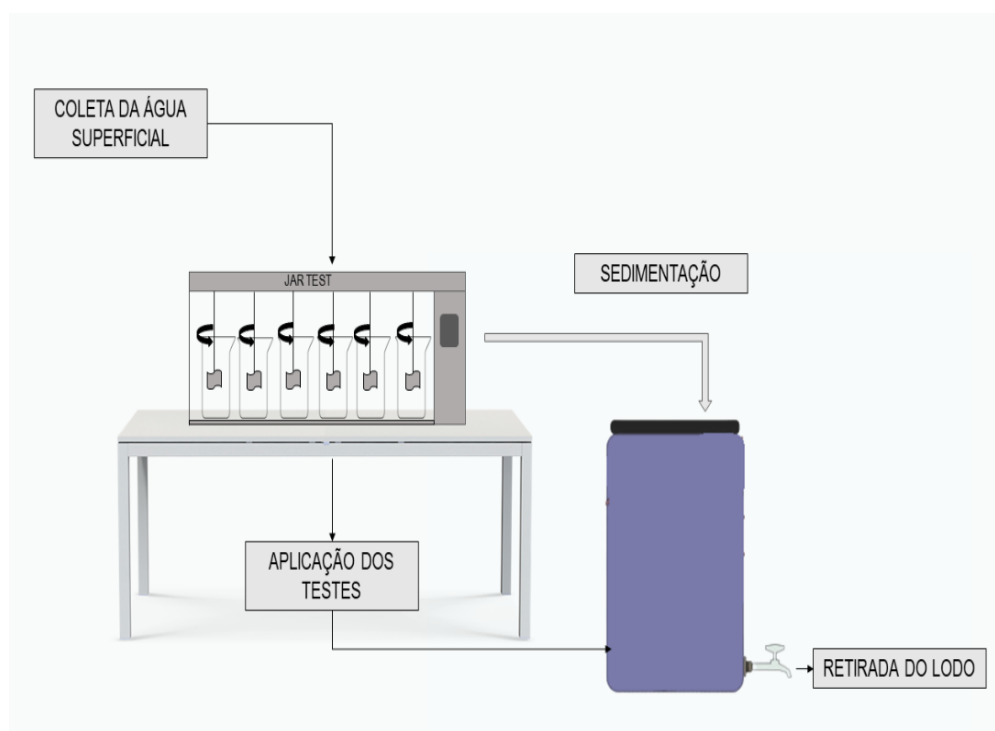
$$d = \begin{cases} 0 & \text{se } y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^s & \text{se } L \leq y \leq T \\ 1 & \text{se } y > T \end{cases} \quad (3)$$

Em que: L é o menor valor aceitável para a resposta e s é o peso atribuído.

3.4 PROCESSO DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO

O processo de coagulação, floculação e sedimentação foi baseado em pré-testes realizados com a água superficial coletada na primeira etapa da pesquisa, buscando garantir a uniformidade da água em todos os testes aplicados. Na Figura 5 há representação do processo simplificado adotado.

Figura 5 - Processo simplificado de trabalho adotado na etapa de clarificação.



Fonte: Autora, (2024).

A coagulação foi aplicada na água bruta superficial após caracterização físico-química e microbiológica. Os ensaios foram realizados em Jar Test (Modelo: Floc Control II, Marca: PoliControl). As dosagens de coagulante foram baseadas no planejamento experimental realizado, onde aplicou-se a melhor condições operacional observada para a matriz total de água.

Para a etapa de sedimentação foram utilizadas bombonas de PVC com capacidade de 240 L e, com base no observado nos pré-testes fixou-se uma etapa de sedimentação de 24 h. Após este período o lodo gerado era separado da água tratada, sendo está encaminhada para o reservatório de abastecimento da etapa seguinte de tratamento. Ressalta-se que o lodo gerado seguiu as recomendações de disposição final do fabricante.

3.4.1 Coagulante

O coagulante utilizado nesta pesquisa é derivado de um polímero de origem vegetal com massa molecular alta (2.000 a 4.000 g mol^{-1}) e ativadores. O polímero orgânico catiônico é conhecido como Tanato Quaternário de Amônio e é essencialmente obtido por meio do processo de lixiviação aquosa da casca da Acácia-negra (*Acacia decurrens*). O coagulante atua

em uma ampla faixa de pH, e também consegue desempenhar o papel de coagulante/floculante sob determinadas condições.

O coagulante utilizado é fabricado pela empresa QUIMIPAR LTDA e o nome comercial do produto é ORGANOTRAT 100. Conforme informações do próprio fabricante o coagulante é aplicado em ETA, bem como em estações de efluentes de indústrias de ramos variados. Na Tabela 4 são apresentadas as principais propriedades físico-químicas do coagulante.

Tabela 4 - Propriedades físico-químicas do coagulante.

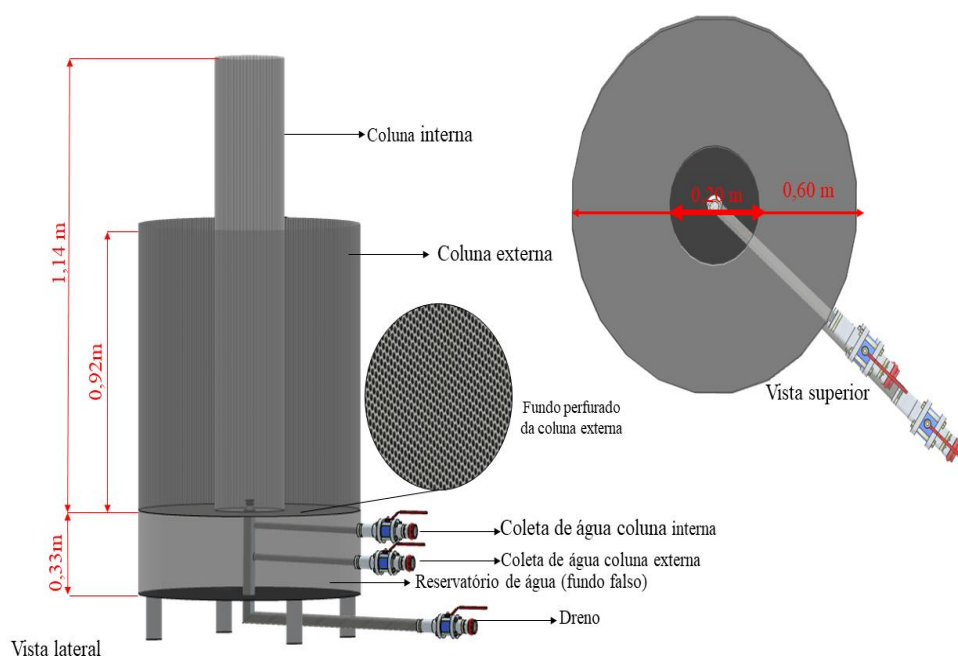
COMPOSIÇÃO	
Tanato Quaternário de Amônio	12,00 a 18,00%
Ativadores	qsp 100%
PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	
Estado Físico	Líquido
Cor	Marrom
Solubilidade	100% em água
pH (solução a 10%)	2,00 a 3,00
Densidade (20°C)	1,04 a 1,10 g cm ⁻³ a 20 °C
Teor de Sólidos (%)	12,00 a 18,00
Nota: Quantidade suficiente para (qsp)	
Fonte: Autora com base em relatório técnico QUIMIPAR LTDA (2024).	

De acordo com o fabricante, as principais vantagens do uso do agente coagulante incluem: i) Não incorpora sais nos sistemas tratados, tais como sulfatos, cloretos, carbonatos, alumínio, ferro, hidróxidos, etc.; ii) Devido a sua estrutura molecular, atua quelando metais, desta forma reduz os metais normalmente contidos na água bruta (principalmente ferro e manganês); iii) Não altera significativamente o pH da água ou do efluente a serem tratados. Esta facilidade é um diferencial importante, principalmente quando se tem variações de carga orgânica da água bruta ou do efluente, pois na necessidade de se aumentar a dosagem de coagulante, o pH não sofrerá variação; iv) Não necessita de pré-alcalinização, pois atua em uma ampla faixa de pH: 5,00 a 8,00; iv) Necessita de uma concentração menor de auxiliares de floculação (floculantes), pois sua reação, além de desestabilizar o meio, ele realiza agregação dos coágulos.

3.5 REATOR DE LEITO FIXO CONTÍNUO

Considerando os pressupostos teóricos da combinação de tecnologias para o tratamento de água, Alves (2018)² propôs uma nova configuração de reator para potabilização de água em escala real. O Reator de Leito Fixo Contínuo (RLFC) combinou as tecnologias de filtração rápida em areia e filtração/adsorção em CAG para o tratamento da água. Toda construção do RLFC e suas respectivas operações foram baseadas em recomendações da ABNT NBR nº 12.216:1992, sendo este construído em aço inox 370, contendo duas colunas como principais componentes do RLFC (Figura 6).

Figura 6 – Representação do RLFC.



Fonte: Autora (2024).

A construção do RLFC em escala real foi precedida de estudos preliminares realizados por Back (2018), Souza (2022) e Thomas (2022) em um reator com características similares em escala piloto, os estudos avaliaram a eficiência e a aplicabilidade do reator quanto a aspectos operacionais e de manutenção.

Os testes no RLFC iniciaram em 2022, com um estudo realizado por Ferreira (2023) onde avaliou-se a eficiência do RLFC para potabilização de água subterrânea em área desassistida por companhia de saneamento, os resultados confirmaram a capacidade de potabilização de água subterrânea pelo RLFC. Sequencialmente as pesquisas no RLFC,

² Desenvolvido por Alves (2018) de acordo com a Chamada Universal MCTIC/CNPq nº28/2018.

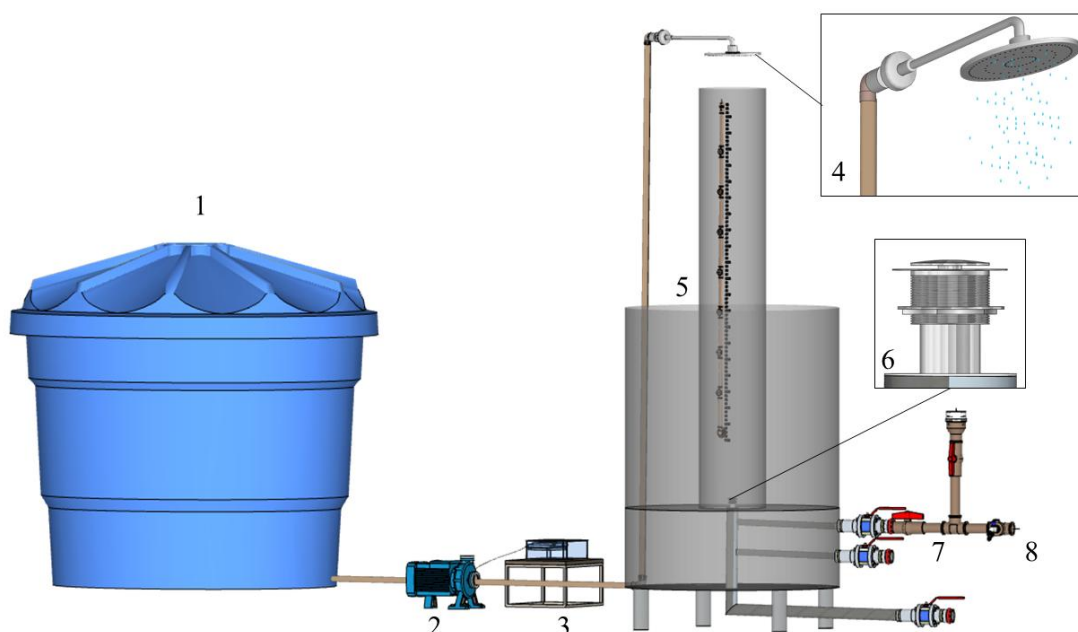
Chiquim (2024) avaliou a eficiência do RLFC em três operações com duas matrizes de água distintas, sendo duas operações com água de captação subterrânea e a terceira com água de captação superficial. Os resultados indicaram que para ambas as matrizes avaliadas o RLFC apresentou eficiência e alto potencial para o tratamento de água. Ainda, surgiu-se a aplicação de novos testes para elucidação do comportamento e desempenho do RLFC, com ênfase em testes considerando a implantação de um controlador de vazão preciso e de acessório para melhor distribuição na entrada da água bruta no RLFC, diferentes composições de leitos fixos, ensaios de retrolavagem, implementação da automação para controle de válvulas e aplicação a campo do RLFC.

Considerando os aspectos observados em estudos anteriores, novos testes foram conduzidos no RLFC, onde algumas modificações estruturais e operacionais foram realizadas. As principais modificações dizem respeito a:

1. Ampliação da coluna interna, a qual passou de 1,14 m para 2,1 m.
2. Instalação de um distribuidor de água na entrada de filtro.
3. Testes com novas configurações de leito, utilizando apenas a coluna interna.
4. Instalação de um dosador de cloro ao fim do tratamento.
5. Teste em uma nova matriz, utilizando água superficial, com aplicação de pré-tratamento de coagulação.

A operação do RLFC foi realizada após a aplicação do processo de coagulação, floculação e sedimentação, ressalta-se que as condições operacionais investigadas foram baseadas em pré-testes. Na Figura 7 se apresenta a visão geral do RLFC.

Figura 7 – Visão geral do funcionamento do RLFC.



Nota: Reservatório de água coagulada (1); Bomba de água (2); Inversor de frequência (3); Distribuidor de água na entrada do filtro (4); RLFC (5); Crepina (6); Dosador de cloro (7); Coleta de ATCC (8).

Fonte: Autora, (2024).

Após o processo de coagulação, floculação e sedimentação, a água adentrava ao RLFC com auxílio de uma bomba de água (Dancor – CP-4R 0.5CV) acoplada a um inversor de frequência (WEG – CFW10 EASYDRIVE). A água passava por uma tubulação de PVC DN 25, até a entrada do RLFC, onde por meio de um distribuidor de vazão buscou-se minimizar a existência de caminhos preferenciais no leito filtrante do RLFC.

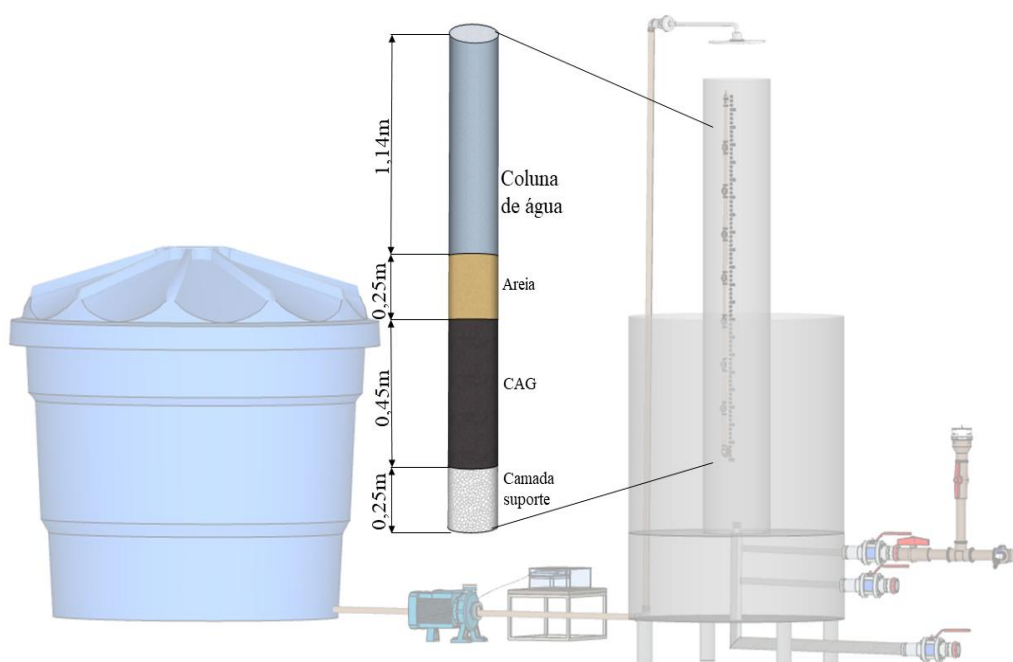
O ajuste de vazão foi mantido de forma que durante a operação a taxa de aplicação superficial (TAS) permanecesse próxima de $120 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. De acordo com os resultados de pré-testes e operações anteriores, a referida TAS permitiu o melhor comportamento do RLFC, sem que ocorresse arrastes indesejados de partículas. Sequencialmente a água passava pelo processo de desinfecção por um dosador de cloro de pastilhas do tipo comercial acoplado na saída da água filtrada por dupla camada de areia com CAG.

Ressalta-se que nesta pesquisa a coluna externa do RLFC não foi utilizada, dessa forma a composição de leito estudada foi toda disposta na coluna interna. Ainda, para garantir que a água não transpassasse o ponto de coleta as válvulas de abertura da coluna externa e também do dreno permaneceram fechadas durante toda a operação.

3.5.1 Filtração em dupla camada

A composição da camada suporte e dos leitos filtrantes em dupla camada utilizados seguiram as recomendações da ABNR NBR N° 12.216:1992. Para composição da camada suporte foram utilizados seixos rolados, enquanto pra dupla camada filtrante utilizou-se carvão ativado granular (CAG) e areia. A distribuição das camadas suporte e filtrantes podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8 - Camada utilizadas no RLFC.



Fonte: Autora, (2024).

As camadas suporte, de CAG e de areia foram dispostas com o auxílio de uma pá de metal esterelizada. Acomodou-se a camada suporte, o leito de CAG e o leito de areia de forma que não ocorresse movimentações durante o processo. Tal processo deu-se após a limpeza do RLFC com uma solução de hipoclorito de sódio (1%) (exceto o CAG) e água destilada.

A camada suporte foi constituída por seixos rolados posicionados estrategicamente considerando granulometria decrescente no sentido ascendente. Conforme recomendações da ABNT NBR n° 12.216:1992 utilizou-se uma camada suporte de 0,25 m, a granulometria dos seixos utilizados e a altura de camada extrato podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição camada suporte do RLFC.

Extrato	Altura	Granulometria
5	1 cm	2 mm
	4 cm	2,36 mm
4	5 cm	4,75 mm
3	3 cm	6,3 mm
	3 cm	9,5 mm
2	4 cm	12,7 mm
1	2 cm	19 mm
	3 cm	25 mm

Fonte: Autora, (2024).

Para preparação do material que compõe a camada suporte elaborou-se um protocolo de limpeza de forma a garantir que não ocorram contaminações da água durante o processo de tratamento. O protocolo consistiu em lavar cinco vezes com água corrente, molho de hipoclorito de sódio (1%), nova lavagem com água destilada, secagem em estufa, ensaio de granulometria e armazenamento em recipientes limpos até o momento do uso.

Após a camada suporte foram alocados na devida ordem os leitos filtrante/adsorvente de CAG e filtrante de areia. Para a composição do leito de filtrante/adsorvente utilizou-se uma camada de 0,45 m de CAG do tipo comercial com origem do epicarpo de babaçu (*Orbignya phaleratta*) com uma granulometria aproximada de 1,18 mm. O carvão foi ativado fisicamente com vapor d'água, seguindo orientações do fabricante. Posterior a isso, a preparação do material e do leito seguiram as recomendações da Norma ASTM *International* D6586 (ASTM, 2014).

Para a camada filtrante utilizou-se uma camada de 0,25 m de areia, com uma granulometria de 0,555 mm e coeficiente de uniformidade 1,42. A areia utilizada passou pelo processo de limpeza de lavagem com água corrente, molho de hipoclorito de sódio (1%) por 30 min, lavagem com água destilada e secagem em estufa a 110 °C durante 24 h. Posterior a isso o material passou por um ensaio de granulometria para garantir a homogeneidade de toda amostra, conforme ABNT NBR nº 7181:2016.

3.5.2 Parâmetros físico-químicos e hidráulicos

Para a operação do RLFC os parâmetros físico-químicos e hidráulicos foram monitorados a cada 5 min, sendo que para as amostras microbiológicas considerou-se a coleta no início e no fim da operação. Para avaliar o desempenho do RLFC na configuração estudada determinou-se o monitoramento dos parâmetros listados na Tabela 6. Onde a eficiência do tratamento foi baseada na variação significativa dos parâmetros com base na caracterização

inicial da água superficial, a água coagulada na entrada do filtro e a água tratada por coagulação, filtração em dupla camada e desinfecção ao fim do tratamento.

Tabela 6 – Parâmetros físico-químicos e microbiológicos monitorados.

Parâmetro	Unidade	Método	Equipamento
Cor aparente	uH	2120 E (APHA, 2012)	Colorímetro DM-COR Digimed
Turbidez	UNT	2130 B (APHA, 2012)	Turbidímetro DM-TU Digimed
pH	-	4500 (APHA, 2012)	pHmetro mPA-210 MS TecnoPON
Condutividade Elétrica	($\mu\text{S cm}^{-1}$)	2510 B (APHA, 2012)	Condutivímetro DM-32 Digimed
Alcalinidade	(mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)	9211 (APHA, 2012)	Kit Teste de piscina
Cloro livre	(mg L^{-1})	9211 (APHA, 2012)	Kit Teste de piscina
Coliformes totais	presença ou ausência	SM 9221 D (APHA, 2012)	Aquatest coli Laborclin
<i>Escherichia coli</i>	presença ou ausência	SM 9221 F (APHA, 2012)	Aquatest coli Laborclin

Nota: Unidade de Hazen (uH); Unidade de Turbidez Nefelométrica (UNT); Microsiemens por centímetro ($\mu\text{S cm}^{-1}$); Miligramas de Carbonato de Cálcio por litro (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$); American Public Health Association 2012 (APHA, 2012).

Fonte: Autora, (2024).

Os parâmetros monitorados foram relacionados em termos de eficiência aos valores máximos permitidos (VMP) nas Portarias do MS Nº 5/2017 e Nº 888/2021, considerando a relevância no impacto desses parâmetros sobre o sistema de tratamento adotado.

Para a avaliação hidráulica do desempenho do RLFC considerou-se o monitoramento da taxa de aplicação superficial (TAS) e a perda de carga no leito filtrante de areia e CAG. O monitoramento foi feito por meio do controle de vazão na entrada do filtro e piezômetro na coluna de água (Figura 7), com inspeção a cada cinco minutos durante toda a operação (Leal, 2022).

Adotou-se para o filtro rápido de fluxo descendente o modo de operação em taxa constante, ou seja, a vazão de entrada manteve-se o mais uniforme possível durante toda a operação. A TAS é a relação entre a vazão de entrada de água por unidade de área do filtro e para esta pesquisa considerou-se o descrito na Equação 4.

$$TAS = \frac{Q}{A_s} \quad (4)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão apresentados na forma de artigo científico, intitulado “**Desempenho do novo layout do Reator de Leito Fixo de Contínuo (RLFC) em escala real para tratamento de água do abastecimento público em áreas rurais**”

4.1 ARTIGO

Desempenho do novo layout do Reator de Leito Fixo de Contínuo (RLFC) em escala real para tratamento de água do abastecimento público em áreas rurais

Resumo

Esta pesquisa investigou o desempenho de um novo Reator de Leito Fixo Contínuo (RLFC) após coagulação orgânica no tratamento de águas superficiais para abastecimento público de áreas rurais isoladas de sistemas de água potável. O tratamento da água considerou inicialmente a etapa de clarificação e, sequencialmente, o tratamento no RLFC em escala real, denominado etapa de filtração. Na etapa de filtração, foi realizada filtração rápida em filtro granular de dupla camada no RLFC formado por areia e carvão ativado granular, seguida do processo de desinfecção com cloro. Na etapa de clarificação, utilizou-se um planejamento fatorial completo 2^3 , e foi avaliada a remoção das variáveis de resposta: cor aparente e turbidez. Os resultados de clarificação indicaram a remoção de aproximadamente 52% da cor aparente e 47% da turbidez, com dosagem ótima de coagulante de $0,83 \text{ mL L}^{-1}$, agitação de 245 RPM e 10 min de tempo de contato. Para o CFBR, a análise estatística indicou variação significativa ($p < 0,05$) nos parâmetros cloro livre, pH, condutividade elétrica, cor aparente e turbidez entre a água clarificada que entra no sistema e a água tratada em ciclo completo. A aplicação do CFBR com uso de coagulante orgânico nas condições ótimas investigadas mostrou-se eficiente no atendimento aos padrões de potabilidade avaliados considerando o tratamento de águas superficiais destinadas ao abastecimento público em áreas rurais. Além disso, a aplicação de desinfecção com cloro indicou inativação completa dos microrganismos presentes. Ademais, a eficiência do tratamento foi garantida pelo atendimento aos parâmetros de potabilidade descritos na Diretiva 98/83/CE do Parlamento Europeu e do Conselho sobre a qualidade da água destinada ao consumo humano, Regulamento Nacional de Água Potável Primária- 40 CFR Parte 141 dos EUA e Portarias nº 5/2017 e nº 888/2021 do Ministério da Saúde do Brasil.

Palavras-chave: Tratamento de água; Coagulante orgânico; Filtração em duas camadas; Carvão ativado granular.

1. INTRODUÇÃO

Embora sejam reconhecidos os avanços na distribuição de água potável e a redução significativa de doenças transmitidas pela água nas últimas décadas, o acesso universal à água potável segura ainda é um desafio, especialmente nas áreas rurais. No cenário global, o progresso na gestão segura do abastecimento público de água atingiu níveis razoáveis,

crecendo desde 2015 de 56% para 62% nas áreas rurais e de 80% para 81% nas áreas urbanas. No entanto, em 2022, ainda havia 2,2 bilhões de pessoas no mundo sem acesso a água potável gerida com segurança [1]. A falta de acesso aos serviços de abastecimento de água, bem como a precariedade dos sistemas existentes, contribui significativamente para a proliferação de doenças transmitidas pela água e estima-se que 1,4 milhão de mortes poderiam ser evitadas anualmente com sistemas seguros de água potável, saneamento e higiene [2].

A gestão pública dos sistemas de abastecimento é desafiadora, pois considera não apenas a infraestrutura de distribuição, mas todas as etapas interligadas de coleta e tratamento, que afetam diretamente a potabilidade da água distribuída [3]. Em geral, o abastecimento público de água em áreas rurais envolve predominantemente a captação em poços, nascentes ou cisternas, que por vezes são negligenciados e apresentam estruturas precárias. Esse fato ocorre devido à deficiência dos serviços de saneamento básico em áreas rurais, especialmente pela impossibilidade de expansão dos serviços de água para essas regiões devido aos custos de operação e manutenção, dispersão geográfica e fragilidade do suporte técnico e da mão de obra [4].

Atualmente, as áreas rurais dependem principalmente de sistemas descentralizados de tratamento e abastecimento de água, que têm se mostrado uma estratégia viável para garantir o abastecimento ([5]; [6]; [7]; [8]). Tais sistemas são instalados para atender a uma pequena parcela da população, exigindo espaço reduzido para sua instalação. Além disso, o método de operação e manutenção é facilitado, podendo ser mantidos pelas famílias atendidas [9]. Além disso, reforça a importância desses sistemas para o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 da Agenda 2030, visto que as maiores dificuldades na universalização dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário ainda são identificadas nas áreas rurais e periféricas [10].

Para garantir a adequação de sistemas descentralizados, o projeto do sistema de tratamento é um fator determinante, portanto, todas as condições que afetam a eficiência devem ser consideradas, tais como: a qualidade inicial da água, os padrões a serem atendidos, o volume a ser tratado, a tecnologia utilizada, a vazão, o modo de operação (fixo ou móvel), entre outros. Atualmente, os reatores que empregam os processos de filtração e filtração/adsorção são os mais utilizados no tratamento de água, onde, quando aplicados em larga escala, são favorecidos em colunas de leito fixo com fluxo contínuo ([11]; [12]; [13]; [14]; [15]).

A filtração rápida emprega o método de alta taxa de aplicação, restando grandes quantidades de partículas indesejáveis em um tempo menor, exigindo retrolavagens frequentes. Para reduzir a frequência de lavagem, a filtração rápida é frequentemente combinada com outras

tecnologias de pré-tratamento, como a coagulação [16]. Além disso, para águas superficiais, a aplicação da coagulação proporciona melhor desempenho de filtração devido à produção de água de melhor qualidade, aumentando a eficiência das etapas subsequentes [17]. No entanto, a coagulação pode apresentar limitações para a remoção de alguns micropoluentes, sendo necessária a associação com tecnologias avançadas, como a adsorção em colunas utilizando carvão ativado granular (CAG), comumente utilizada na etapa de polimento do tratamento de água [18].

Considerando a necessidade de aplicação de tecnologias voltadas para áreas rurais, garantindo eficiência no tratamento, facilidade de instalação e operação, o novo Reator de Leito Fixo Contínuo (RBCF) combinou tecnologias de filtração rápida em areia e adsorção em CAG para purificação de água em áreas rurais. Os estudos sobre a aplicabilidade do RBCF vão além dos ensaios em laboratório ([19];[20]), passando por escala piloto ([21]; [22]; [23]), chegando à escala real ([24]; [25]), com avaliação da aplicabilidade em fontes hídricas superficiais e subterrâneas, bem como com diferentes poluentes.

Devido à sua versatilidade, o RBCF permite uma ampla variedade de configurações operacionais, podendo inclusive ser utilizado em conjunto com outras tecnologias de tratamento, como a coagulação natural. O coagulante orgânico apresenta os mesmos mecanismos de remoção de impurezas que o coagulante químico, porém com a produção de lodo biodegradável em menor quantidade [26].

Apesar dos avanços nas tecnologias de tratamento de água de abastecimento, a implementação de sistemas descentralizados em larga escala em áreas rurais permanece pouco explorada, com os estudos existentes concentrando-se predominantemente em avaliações em escala piloto. Essa lacuna destaca a necessidade de pesquisas abrangentes para avaliar a eficácia e a praticidade dos sistemas descentralizados de tratamento de água em ambientes rurais. Assim, para suprir a lacuna da inexistência e fragilidade dos sistemas públicos de abastecimento de água em áreas rurais, bem como expandir o sistema de tratamento de CFBR, este estudo teve como objetivo investigar o desempenho do novo CFBR após clarificação da água usando um coagulante orgânico para a potabilização de águas superficiais em áreas rurais sem assistência de empresas de saneamento.

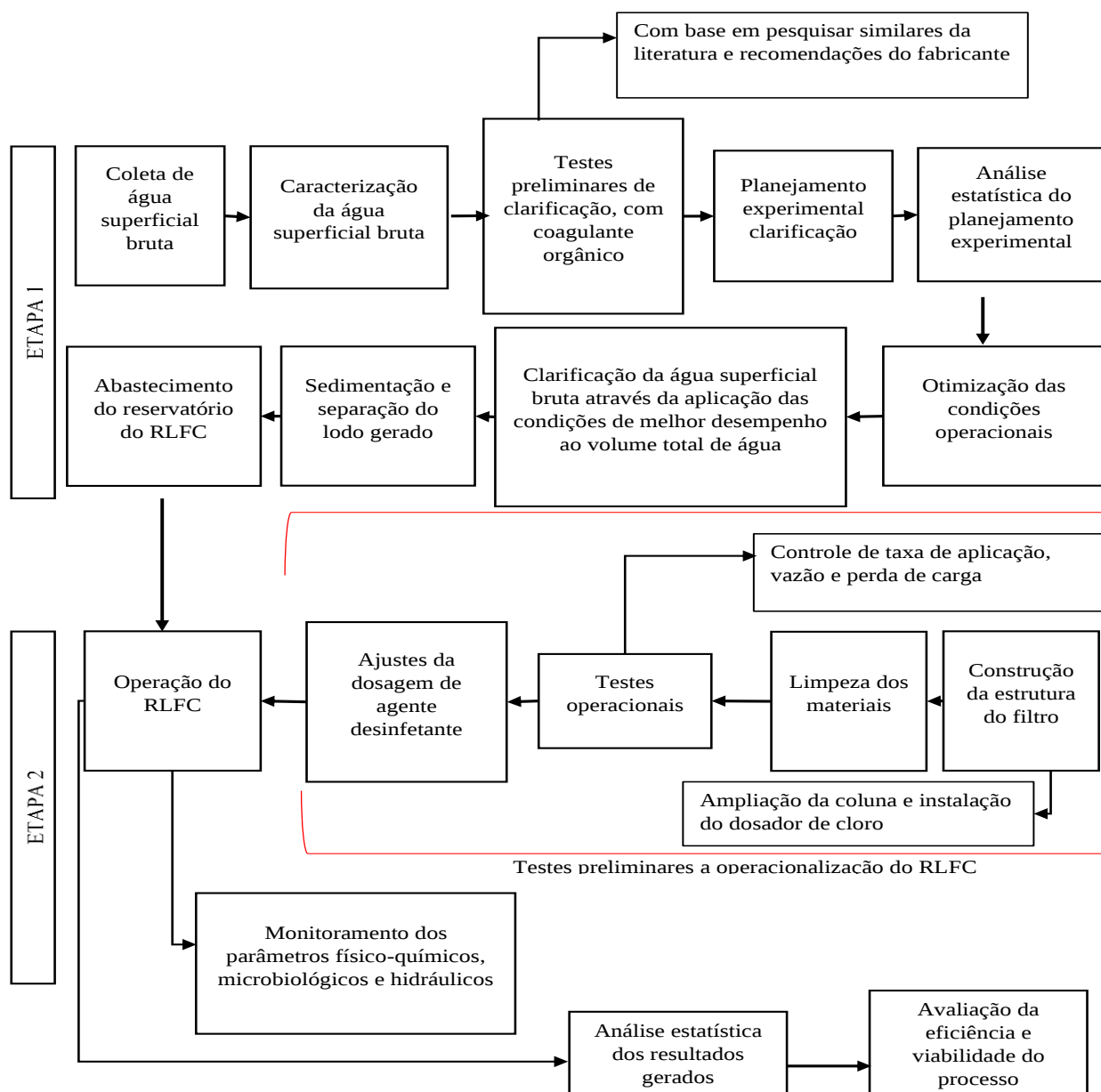
2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 COLETA, CARACTERIZAÇÃO E CLARIFICAÇÃO DA ÁGUA SUPERFICIAL– ETAPA 1

Para fins de avaliação da eficiência de tratamento diferenciou-se as amostras considerando as etapas, assim denominou-se a água superficial não tratada como água bruta (AB), a água que abastece o sistema principal de água clarificada (AC) e a água da saída do sistema principal com passagem pelo dosador de cloro como água tratada por ciclo completo (ATCC).

Todos os testes e análises foram realizadas no Laboratório de Águas e Ecotoxicologia (LAE), localizado na Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Cerro Largo/RS, Brasil. Considerando as condições de viabilidade existentes, dividiu-se o processo de trabalho em duas grandes etapas, conforme Figura 1.

Figura 1- Fluxograma do processo de tratamento.



De maneira geral, a etapa 1 de trabalho compreendeu a coleta e caracterização da água superficial bruta, bem como todo o processo de clarificação desta água. A etapa 2 compreendeu a investigação completa da eficiência do RLFC, partindo desde a construção da ampliação proposta até a análise estatística e comparativa com resultados obtidos pelo monitoramento dos parâmetros durante a operação.

A água estudada nesta pesquisa é proveniente de amostras de águas superficiais, coletadas em um corpo hídrico em uma área rural localizada na Região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. A definição do local de coleta foi baseada em critérios previamente definidos, considerando que se tratava de água superficial proveniente de corpo hídrico localizado predominantemente em áreas rurais, que estava em desacordo com os padrões de potabilidade descritos nas Portarias nº 5/2017 [27] e nº 888/2021 [28] do Ministério da Saúde, e que possuía sistema de coleta ou acesso implantado. Para garantir a homogeneidade durante os ensaios, foi retirada uma única amostra de volume suficiente para a realização de todos os ensaios propostos. O procedimento de coleta e preservação seguiu as recomendações estabelecidas pela norma ISO 5667-3:2024 [29].

Realizou-se a análise das características físico-químicas e microbiológicas da água superficial, considerando os parâmetros descritos na Tabela 1. As características da água bruta também foram utilizadas para calcular a eficiência da coagulação, especialmente pelas porcentagens de remoção de turbidez e cor aparente após aplicação da dosagem ótima de coagulante.

Tabela 1- Parâmetros físico-químicos e microbiológicos monitorados.

Parâmetro	Unidade	Método	Equipamento
Cor aparente	uH	2120 E*	Colorímetro DM-COR Digimed
Turbidez	UNT	2130 B*	Turbidímetro DM-TU Digimed
pH	-	4500*	pHmetro mPA-210 MS Tecnozon
Condutividade Elétrica	($\mu\text{S cm}^{-1}$)	2510 B*	Condutivímetro DM-32 Digimed
Alcalinidade	(mg CaCO_3 L^{-1})	9211*	Kit teste rápido
Cloro livre	(mg L^{-1})	9211*	Kit teste rápido
Coliformes totais	presença ou ausência	SM 9221D*	Aquatest coli Laborclin
<i>Escherichia coli</i>	presença ou ausência	SM 9221F*	Aquatest coli Laborclin

Nota: Unidade de Hazen (uH); Unidade de Turbidez Nefelométrica (UNT); Microsiemens por centímetro ($\mu\text{S cm}^{-1}$); Miligramas de Carbonato de Cálcio por litro (mg $\text{CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$); American Public Health Association 2012 (*)[52].

A coagulação aplicada em águas superficiais teve como objetivo a clarificação da água, investigando assim a remoção da cor aparente e da turbidez, considerando os valores descritos na Diretiva 98/83/CE, EPA - Regulamentos Nacionais de Água Potável Primária, 40 CFR Parte 141 e Portarias MS Nº 5/2027 e Nº 888/2021. Todos os ensaios foram conduzidos em Jar Test (Modelo: Floc Control II, Marca: PoliControl), onde as condições operacionais foram obtidas por meio de planejamento experimental baseado em pré-testes, seguindo as informações e recomendações do fabricante.

O agente coagulante empregado na etapa de clarificação da água bruta é do tipo comercial, derivado de um polímero orgânico catiônico, comercialmente conhecido como Tanato Quaternário de Amônio (12,00 a 18,00%), obtido através da lixiviação aquosa da casca da *Acacia decurrens*. A coagulação não demandou de pré-alcalinização da água bruta, além de não alterar significativamente o pH da água tratada.

O processo adotado compôs-se na coleta e caracterização da água superficial, seguido dos ensaios investigando as condições operacionais ideais, posteriormente a água coagulada era submetida a etapa de sedimentação, assim fixou-se um tempo de sedimentação de 24 h. Após a sedimentação o lodo gerado era coletado e a água clarificada encaminhada para o reservatório de abastecimento da próxima etapa previamente ao RLFC. O lodo gerado seguiu as recomendações de disposição final do fabricante.

2.1.1 Planejamento experimental e análise estatística da clarificação da água

O planejamento experimental da clarificação foi baseado em um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) [32]. Precedentemente foram realizados testes preliminares de acordo com recomendações do fabricante do coagulante utilizado. Os resultados obtidos foram utilizados para gerar o planejamento fatorial completo 2^3 , com 17 ensaios, incluindo oito pontos fatoriais (-1 e 1), seis pontos axiais (-1,68 e 1,68), e três repetições do ponto central (0), com investigação de três variáveis independentes: dosagem de coagulante (X_1), velocidade de agitação (X_2) e tempo de contato (X_3), Tabela 2.

Tabela 2-Valores estudados para as variáveis independentes no delineamento fatorial completo 2^3 .

Variável independente	Código	-1,68	-1	0	1	1,68
Dosagem de coagulante (mL L ⁻¹)	X ₁	0,035	0,35	0,83	1,3	1,63
Velocidade de agitação (RPM)	X ₂	186	210	245	280	303
Tempo de contato (min)	X ₃	1,6	5	10	15	18

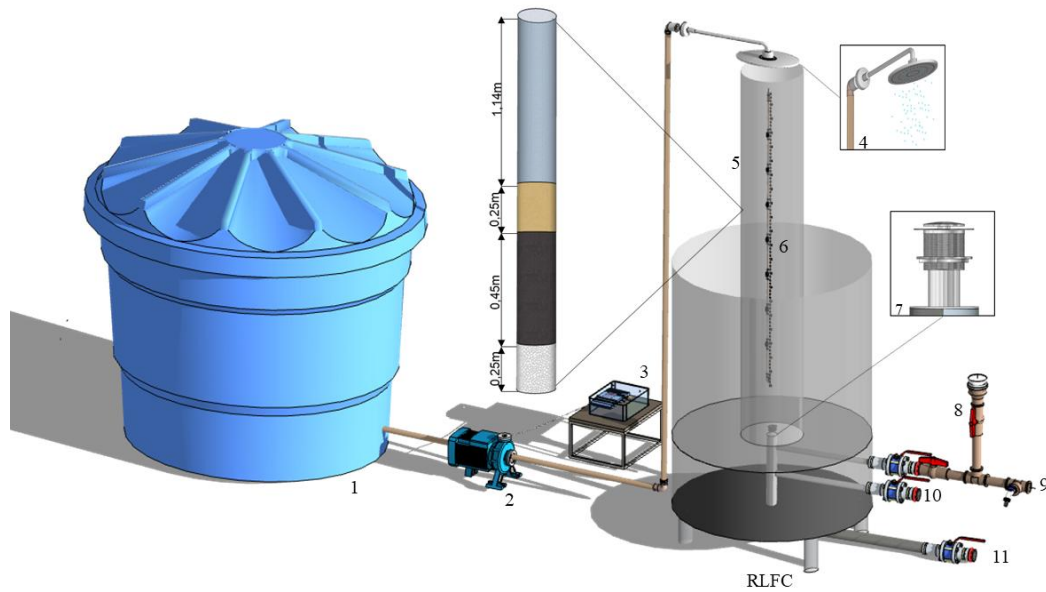
A avaliação da eficiência da clarificação baseou-se na remoção das variáveis dependentes: cor aparente e turbidez. Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente no software Statistica® 11, considerando os efeitos de regressão da Análise de Variância (ANOVA), para tal considerou-se o nível de confiança de 95% ($p\text{-valor} \leq 0,05$). As condições operacionais de maior desempenho da clarificação foram aplicadas aos ensaios experimentais finais.

2.2 REATOR DE LEITO FIXO CONTÍNUO (RLFC) – ETAPA 2

Considerando os pressupostos teóricos dos sistemas de tratamento de água, foi proposta uma nova configuração de reator em escala real para purificação de água em áreas rurais. O Reator de Leito Fixo Contínuo (RLFC), combinou os processos de tratamento de filtração rápida em areia e adsorção em carvão ativado granular. Todo processo construtivo do RLFC baseou-se nas recomendações descritas na Norma Técnica ABNT NBR n° 12.216:1992 [33].

O RLFC foi confeccionado em inox, contendo duas colunas para acomodação dos leitos utilizados para tratamento, o retrospecto de construção e as principais características foram explicitadas por Chiquim *et al.* (2024) [25]. O RLFC permite uma vasta diversificação das configurações de tratamento, desde variações de fluxo e composição de leitos, aplicação para diferentes matrizes aquosas e combinação com outros processos. A composição investigada é exposta na Figura 2.

Figura 2 - Esquema do sistema RLFC.



Nota: Reservatório de água coagulada (1); Bomba de água (2); Inversor de frequência (3); Distribuidor de vazão (4); Coluna de acomodação da dupla camada filtrante/adsorvente com (5); Piezômetro para controle da perda de carga (6); Crepina de retenção de partículas finas (7); Dosador de cloro (8); Ponto de coleta de ATCC (9); Válvula de abertura coluna externa (10); Válvula de abertura dreno (11).

O processo de operação do RLFC foi baseado na inserção da água clarificada armazenada em um reservatório (1) através de uma bomba de água (2) acoplada a um inversor de frequência (3). Após a percolação em fluxo descendente pela dupla camada filtrante a água era submetida a desinfecção em um dosador de cloro do tipo comercial (9) acoplado ao RLFC. O detalhamento completo utilizado na operacionalização e construção do RLFC é elucidado no Quadro 1.

Quadro 1-Detalhamento construtivo e operacional do RLFC.

Reator de Leito Fixo Contínuo		Características do filtro		
Características		Camada suporte	Altura:	0,25m
Material	Aço inox 370		Composição:	Seixos rolados
Coluna externa			Granulometria :	2 mm (1 cm)
Diâmetro	0,60m			2,36 mm (4 cm)
Altura	0,92m			4,75 mm (5 cm)
Volume	0,224309m³			6,3 mm (3 cm)
Coluna interna				9,5 mm (3 cm)
Diâmetro	0,20m			12,7 mm (4 cm)
Altura	1,14m			19 mm (2 cm)
Volume	0,035814m³			25 mm (3 cm)
Reservatório inferior			Disposição:	Ordem decrescente em fluxo ascendente
Diâmetro	0,60m			
Altura	0,33m	Camada de CAG	Origem:	Epicarpo de babaçu (<i>Orbignya phaleratta</i>)
Volume	0,093305m³		Altura:	0,45m
Equipamentos utilizados na operação			Granulometria :	1,18 mm
Reservatório de água			Volume médio dos poros:	0,392 g cm ⁻³
Caixa d'água com capacidade de 200 L utilizada para armazenamento da água clarificada e posterior abastecimento do Reator de Leito Fixo Contínuo (RLFC).			Área superficial:	754,00 m² g ⁻¹
Bomba de água				
Marca: Dancor. Modelo: CP-4R 0.5 CV. Utilizada para alimentar o RLFC a partir do reservatório de água clarificada		Camada de areia	Origem:	Areia de quartzo comercial
Inversor de frequência			Altura:	0,25 m
Marca: WEG. Modelo: CFW10 EASYDRIVE. Utilizado para diminuir a velocidade da bomba de água e manter a vazão ideal para operacionalização.				
Distribuidor de vazão			Granulometria :	0,555 mm
Dispositivo com perfurações na parte inferior de forma a distribuir de forma igualitária a vazão de entrada e diminuir a formação de caminhos preferenciais.				
Crepina			Coeficiente de uniformidade	754,00 m² g ⁻¹ Continúa

Dispositivo utilizado para reter impurezas carregadas durante a percolação da água pelo filtro	A composição e disposição da dupla camada seguiu as recomendações da ABNT NBR nº 12.216:1992 [33].
Dosador de cloro	
Marca: Meu Filtro. Modelo comercial. Utilizado para a desinfecção utilizando pastilha de cloro de 200 g.	
Controle operacional	
Taxa de aplicação superficial	A mais próxima de 120 m³ m⁻² dia⁻¹
Perda de carga	Máxima de 1,14 m antes do transbordo
Tempo de contato com a pastilha de cloro	Aproximadamente 10 segundos, conforme recomendação do fabricante para a vazão utilizada.
Conclusão	

Para efeito de encerramento da operação do CFBR, considerou-se que seria aplicado volume de água suficiente para garantir a utilização de dez volumes de leito, seguindo o que foi testado anteriormente por Alves *et al.*, 2019 [20], considerando cada volume de leito possuir aproximadamente $0,02985 \text{ m}^3$, ou alcance da perda de carga máxima antes do transbordo (1,14 m). A coluna externa do RLFC apresentada na Figura 2 não foi utilizada nesta configuração de tratamento de água de abastecimento, permanecendo as válvulas da coluna e do dreno fechadas durante toda a operação.

Para avaliação da eficiência de tratamento do RLFC realizou-se o monitoramento de parâmetros físico-químicos (cor aparente, turbidez, pH, condutividade elétrica, alcalinidade, cloro livre) e, microbiológicos (coliformes totais e *Escherichia coli*.) considerando os valores máximos permitidos nas Portarias nº 5/2017 e nº 888/2021 do Ministério da Saúde. A eficiência foi baseada na variabilidade dos parâmetros ao longo do processo de tratamento.

Ainda, avaliou-se o comportamento hidráulico do sistema através do monitoramento de perda de carga e taxa de aplicação superficial (TAS), por meio do controle de vazão no distribuidor de vazão e piezômetro instalado na coluna de água. O monitoramento dos parâmetros físicos, químicos e hidráulicos foi realizado a cada cinco minutos durante toda operacionalização do RLFC. Para os parâmetros microbiológicos considerou-se o monitoramento no início e ao término da operação.

2.2.1 Análise estatística do RLFC

Todos os resultados obtidos para os parâmetros físico-químicos durante a operacionalização do RLFC foram submetidos a análise estatística por meio do software Statistica® 11, onde a normalidade dos dados foi verificada através do teste de Shapiro-Wilk. O teste de Shapiro-Wilk é um teste estatístico comum para verificação da normalidade de um conjunto de dados quantitativos (amostra < 50). Para o teste assume-se duas hipóteses, a nula (os dados seguem distribuição normal) e a alternativa (os dados não seguem distribuição normal), onde o valor de p (comumente definido em 0,05) associado define qual a hipótese adequada, sendo que para valores menores que o nível de significância deve-se rejeitar a hipótese nula para sequência dos testes estatísticos [32].

Para fins de comparação entre a água clarificada e a água após tratamento no RLFC utilizou-se o teste estatístico de Wilcoxon, assumindo o pressuposto identificado de que os dados observados não seguiram distribuição normal. O teste de Wilcoxon é um método não-paramétrico para comparação de duas amostras pareadas, equivalendo-se ao teste T de Student. O teste permitiu comparar o desempenho de cada amostra, ou pares de amostra, para verificação de diferenças significativas entre os resultados [35]. Para a análise do teste, as duas hipóteses foram formuladas, sendo: H_0 : Não houve diferenças estatisticamente significativas durante o tratamento ($p > 0,05$) e H_1 : Houve diferenças estatisticamente significativas durante o tratamento ($p \leq 0,05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA SUPERFICIAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA DA OTIMIZAÇÃO DA COAGULAÇÃO ORGÂNICA-ETAPA 1

A análise das características físico-químicas e microbiológicas da água superficial, considerando os parâmetros cor aparente (39,4 uH), turbidez (8,7 UNT), pH (7,4), condutividade elétrica (77,47 mS.cm⁻¹), coliformes totais (positivo) e *Escherichia coli* (positivo), indicaram a necessidade da aplicação de tratamento para garantia dos padrões de potabilidade da água, sendo aplicado inicialmente a clarificação, seguida de filtração em camada dupla no RLFC, e desinfecção final.

As características da água bruta foram utilizadas para calcular a eficiência da clarificação, os resultados da eficiência da etapa de clarificação em que se utilizou de

coagulante orgânico pré-tratamento ao RLFC, considerando o planejamento fatorial completo 2^3 e a respectiva remoção de cor aparente e turbidez são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3-Condições experimentais e resultados obtidos do delineamento experimental para remoção de cor aparente (%) e turbidez (%) da água superficial bruta.

Teste	Dosagem de coagulante (mL L ⁻¹) (X ₁)	Agitação (RPM) (X ₂)	Tempo (min) (X ₃)	%Remoção cor aparente	% Remoção turbidez
1	0,35	280	5	-52,66	-60,89
2	1,62	245	10	-998,98	-140,38
3	0,83	245	10	56,35	75,89
4	1,3	210	5	-825,13	34,94
5	0,83	245	1,64	-3,93	19,68
6	0,35	210	15	-268,02	13,48
7	1,3	280	15	-289,59	-0,32
8	0,030	245	10	4,31	32,28
9	0,83	245	18,36	58,38	82,91
10	1,3	280	5	7,61	7,34
11	0,35	210	5	-38,96	-109,87
12	0,83	186,43	10	36,55	75,51
13	0,35	280	15	36,04	42,28
14	0,83	303,56	10	12,18	47,97
15	0,83	245	10	32,87	65,13
16	1,3	210	15	-888,58	41,84
17	0,83	245	10	56,98	59,24

Nota: Rotações por minuto (RPM).

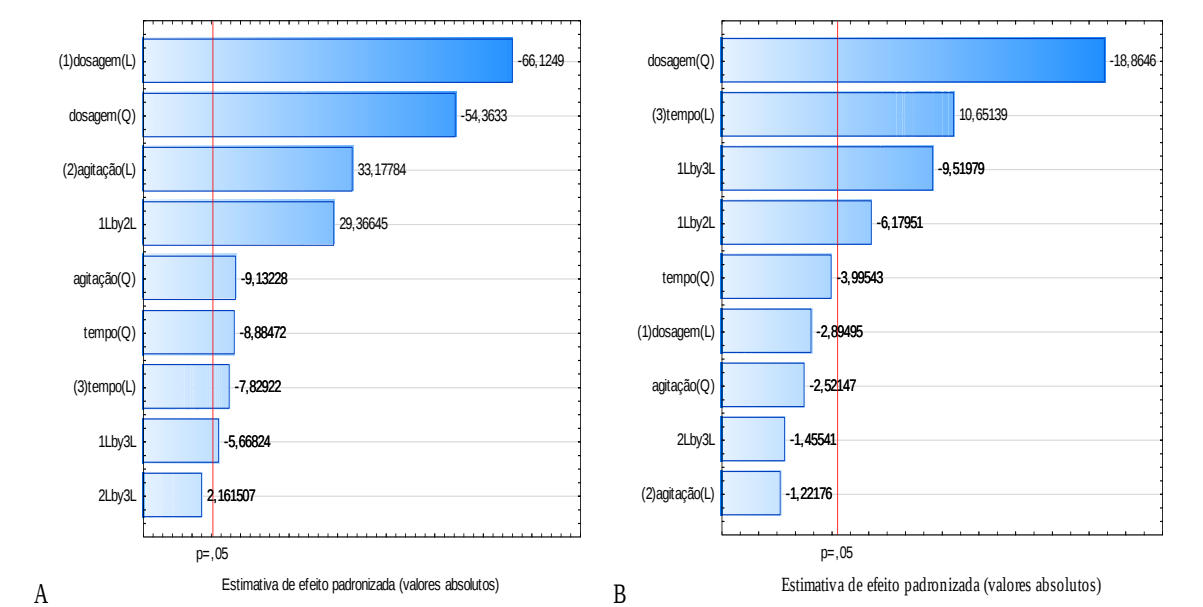
As maiores remoções vinculadas a cor aparente e turbidez foram observadas para a dosagem central (0,83 mL L⁻¹) investigada pelo planejamento, atingindo até 58,38% e 82,91%, respectivamente. Ainda, é possível observar o efeito direto que o tempo e a velocidade de agitação possuem sobre a eficiência de remoção, especialmente da turbidez, visto que mesmo em dosagens mais baixas de coagulante (0,030 mL L⁻¹, 10 min de agitação em 245 RPM) foi possível alcançar 32,28 % de remoção. Entretanto, quando uma dosagem excessiva de coagulante (1,62 mL L⁻¹) é aplicada o observado é um incremento significativo na cor aparente (998%) e turbidez (140%) da água clarificada.

O aumento de cor aparente e turbidez pode ser observado nas maiores dosagens de coagulante orgânico. A dosagem de coagulante é um dos fatores determinantes para a eficiência adequada de remoção das impurezas, visto que a dose de coagulante deve ser suficiente para

garantir a ocorrência dos mecanismos de neutralização de carga ou adsorção, mas em situações de excesso pode ocorrer a reestabilização das partículas [3].

O efeito das variáveis independentes (dosagem de coagulante, velocidade de agitação e tempo de contato) na remoção de cor aparente e turbidez são expressos através dos gráficos de Pareto, conforme Figura 3. A ANOVA do modelo estudado identificou a significância das variáveis independentes, com 95% de significância ($p \leq 0,05$), considerando a remoção das variáveis dependentes (cor aparente e turbidez) e os efeitos observados, conforme Tabela 4.

Figura 3-Estimativa de efeito padronizada com base em variáveis de resposta.



Nota: Estimativa de efeito padronizada: Cor aparente (A); Turbidez (B).

Tabela 4-Estimativa dos efeitos das variáveis independentes.

	Variáveis independentes	Efeito	Erro padrão	t(2)	p-valor
Cor Aparente R ² = 0,85	Dosagem (L)	-492,78	7,452	-66,125	0,000229
	Dosagem (Q)	-447,88	8,239	-54,363	0,000338
	Agitação (L)	247,25	7,452	33,178	0,000907
	Agitação (Q)	-75,23	8,239	-9,132	0,011779
	Tempo (L)	-58,34	7,452	-7,829	0,015925
	Tempo (Q)	-73,19	8,239	-8,885	0,012432
	Dosagem por Agitação (L)	285,34	9,717	29,366	0,001158
	Dosagem por Tempo (L)	-55,076	9,710	-5,668	0,029743
Turbidez R ² = 0,67	Dosagem (Q)	-95,46	5,061	-18,860	0,002798
	Tempo (L)	48,75	4,577	10,650	0,008699
	Dosagem por Agitação (L)	-36,88	5,968	-6,170	0,025202
	Dosagem por Tempo (L)	-56,81	5,968	-9,510	0,010855

Nota: Coeficiente de determinação (R²); Linear (L); Quadrático (Q); Medida da diferença entre as médias dos grupos (t).

O p-valor observado para cada uma das variáveis mostrou-se significativo para 95% de confiabilidade (p-valor $\leq 0,05$) para remoção de cor aparente e de turbidez. O efeito negativo sugere a possibilidade de redução da dosagem, velocidade de agitação e tempo de contato, para o aumento da remoção de cor aparente. Enquanto que, a interação entre a dosagem/agitação sofrem efeito contrário, onde o aumento controlado de ambas propicia um crescimento das taxas de remoção, desde que não ultrapasse a dosagem ideal ($0,83 \text{ mL L}^{-1}$) para garantia dos mecanismos de coagulação.

Para a remoção de turbidez apenas a dosagem e tempo de contato interferem no sistema dentro do intervalo de significância. O efeito negativo da dosagem de coagulante é evidenciado pela diminuição da remoção de turbidez em maiores dosagens, em contrapartida o aumento do tempo de contato efetua positivamente a remoção de turbidez, fato evidenciado no Teste 9 (Tabela 3) no qual foi utilizado coagulante orgânico na concentração de $0,83 \text{ mL L}^{-1}$, a 245 RPM e sob 18,36 min de tempo de contato, nestas condições foi observado 82,91% de remoção de turbidez, em condições semelhantes de dosagem de coagulante e velocidade de agitação

porém com menor tempo de contato (1,64 min), observadas no Teste 5 (Tabela 3), a remoção foi de 19% para turbidez, não ocorrendo remoções de cor aparente nestas condições.

Os efeitos observados são fundamentais para o aprimoramento da técnica de coagulação para águas superficiais pouco contaminadas. Nas Figuras 4 e 5, são apresentados os gráficos tridimensionais de superfície de resposta acerca das remoções de cor aparente e turbidez, tendo como base o planejamento experimental 2^3 investigado.

Figura 4- Superfície de resposta em relação à redução de cor aparente.

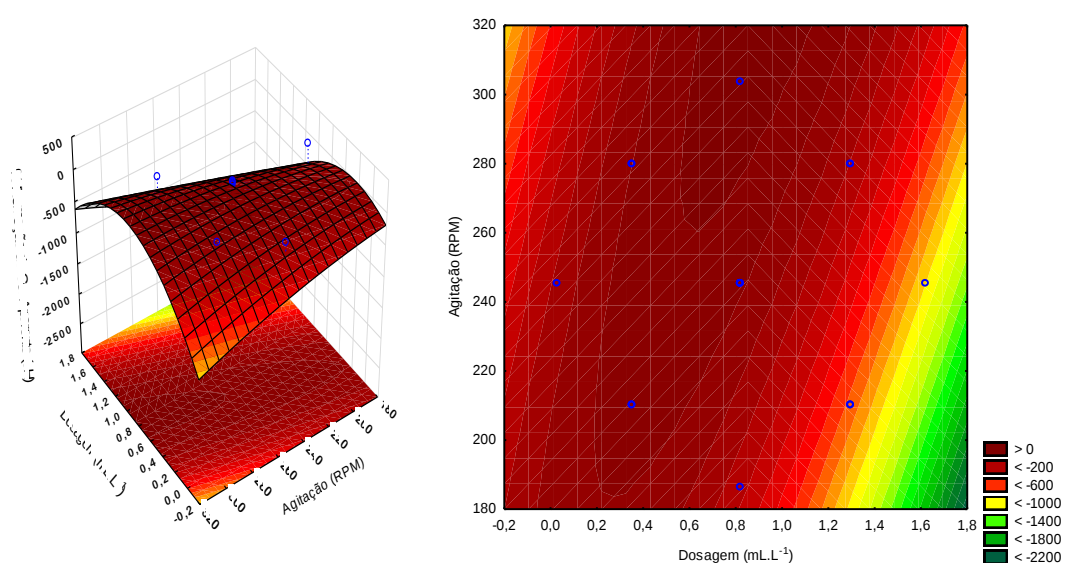
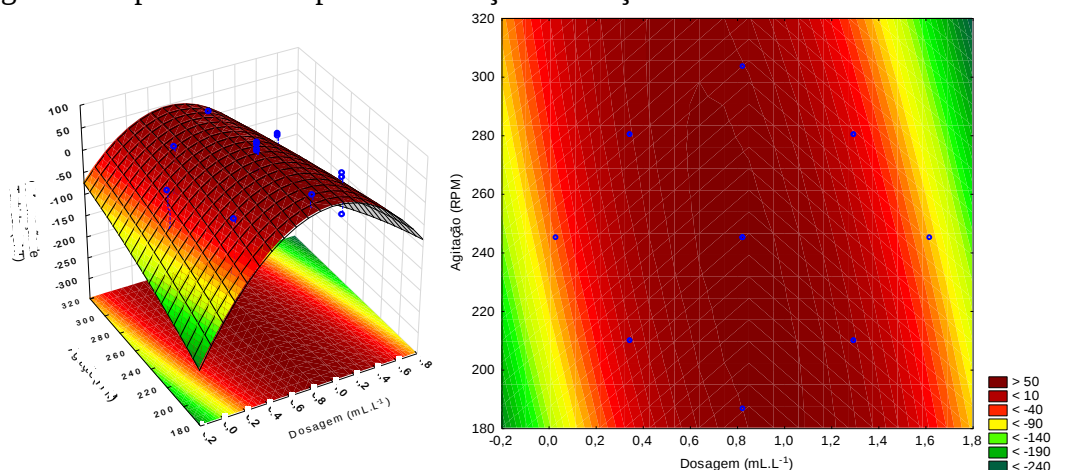


Figura 5- Superfície de resposta em relação à redução de turbidez.

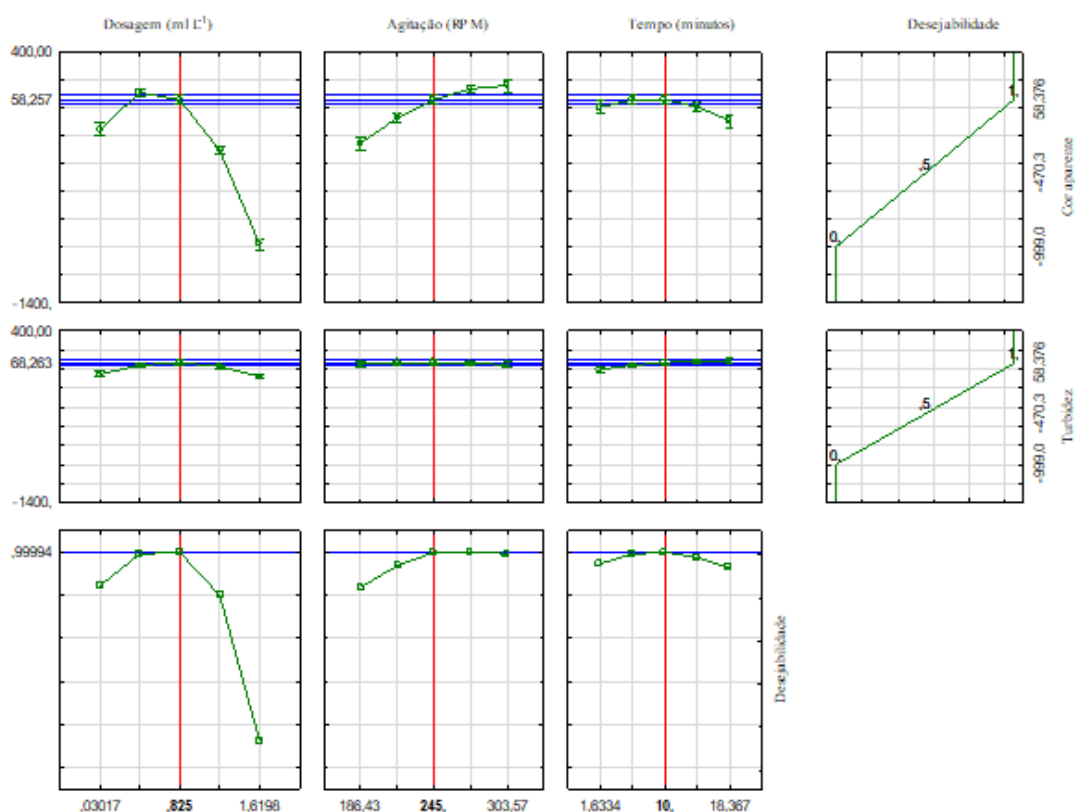


Os gráficos indicam que, de acordo com o modelo aplicado, em dosagens mais baixas ($0,35 \text{ mL L}^{-1}$) a remoção de cor aparente atinge valores satisfatórios de remoção, efeito contrário

da remoção de turbidez onde a faixa de dosagem de coagulante é mais limitada (0,6 - 1 mL L⁻¹) para uma boa remoção (> 50%).

Para validar o modelo de otimização, o teste de *desejabilidade global* foi conduzido dentro das condições ótimas previstas pelo modelo, conforme Figura 6.

Figura 6 –Desejabilidade global do planejamento experimental da clarificação.



Com base nos resultados observados no teste de desejabilidade global o modelo provou ser confiável e preciso para prever a porcentagem de remoção de cor aparente (remoção de 52%) e turbidez (remoção de 47%). Assim, após a validação as condições ótimas de operação para a coagulação foram aplicadas, em sequência a água clarificada foi encaminhada para o filtro estudado.

O uso do coagulante orgânico permitiu uma operação facilitada, especialmente por não demandar de ajustes de pH, sendo de mais fácil aplicação em comunidades rurais. A aplicação de tecnologias com modos de implantação e operação facilitados é favorável para aplicação em comunidades rurais, visto que frequentemente o gerenciamento do abastecimento de água potável é feito pela própria comunidade [33]. Ademais, a participação da comunidade no gerenciamento de água, com aplicação de tecnologias adequadas, favorece o alcance da meta

6.b do ODS 6 da Agenda 2030, onde é pautada a importância de apoiar e fortalecer a participação das comunidades locais para garantir a melhoria da gestão segura da água [9].

A compreensão do comportamento e desempenho de coagulantes orgânicos é necessária para garantir a aplicação em estações de tratamento de água, substituindo, quando possível os coagulantes químicos. Zaman *et al.* (2021) [36] conduziram ensaios comparativos entre um coagulante orgânico a base de quitosana e coagulantes tradicionalmente usados a base de sulfato de alumínio, cloreto de polialumínio e cloridrato de alumínio para águas com variações de turbidez de 20 a 826,3 UNT e valor de pH de 5,21 a 6,80. Os resultados demonstraram bom desempenho da quitosana como coagulante, com capacidade de remoção de 99% de turbidez, além disso o coagulante cloridrato de alumínio superou os demais coagulantes químicos, apresentando resultado de remoção de 97% de turbidez. Seguindo o comportamento observado nesta pesquisa, os autores identificaram desempenho melhor do coagulante orgânico em dosagens mais baixas, indicando uma boa relação custo-benefício para a aplicação.

O aprimoramento de técnica consolidadas do tratamento de água tem-se mostrado vantajosa para descoberta de melhores condições para preenchimento das lacunas ainda existentes no abastecimento e tratamento de água em diversas regiões desassistidas por companhias de saneamento. Adebayo *et al.* (2021)[37], investigou a combinação dos processos usando coagulantes químicos compostos, sulfato de alumínio com cloreto de polidimetil dialil amônio, onde os resultados obtidos indicam uma redução de cerca de 7 a 10% na dosagem de coagulante químico e melhorias significativas na qualidade da água após a passagem pela filtração rápida, com desempenho observado entre 55,60 - 97,26% para turbidez.

O sistema combinado de coagulação mais filtração rápida é vantajoso para aplicação em sistemas descentralizados, como aqueles usuais no meio rural, especialmente pela facilidade de instalação, manutenção e operação. Ainda, o uso de coagulantes orgânicos em sistemas de tratamento de água no meio rural é favorável pela eficiência de tratamento, alta estabilidade do produto, disponibilidade e compatibilidade com outras técnicas, como a filtração [38].

3.2 PERFORMANCE DE TRATAMENTO DO RLFC PÓS-CLARIFICAÇÃO

Considerando o atendimento aos padrões de potabilidade da água estabelecidos na Diretiva 98/83/CE-EPA-Regulamentos Nacionais de Água Potável Primária, 40 CFR Part 141 e Portarias MS nº 05/2017 e nº 888/2021, após tratamento no RLFC através dos processos de filtração em dupla camada de areia e CAG, seguido de desinfecção com cloro, os resultados

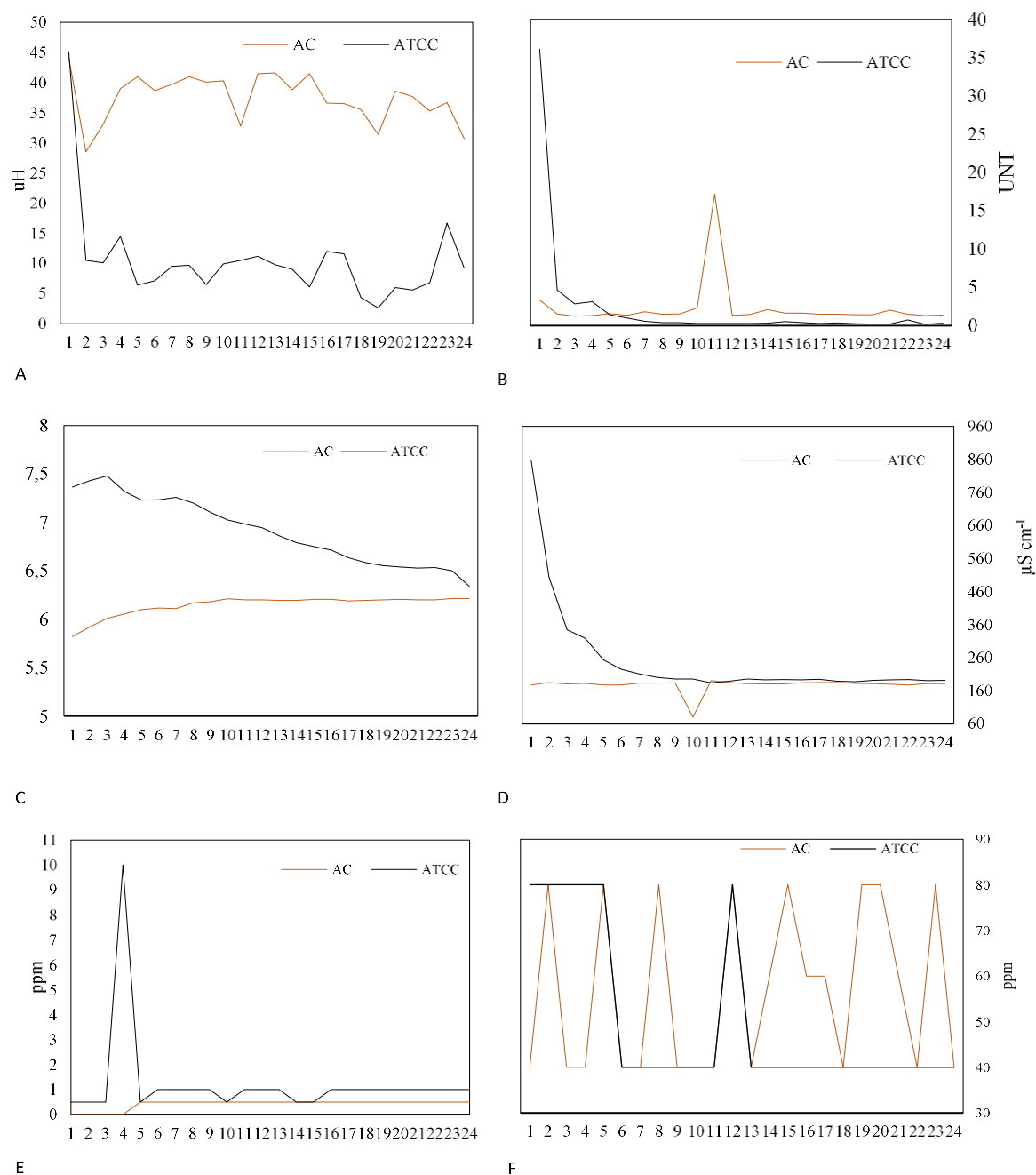
foram expressos na Tabela 6. Além disso, a variabilidade dos parâmetros avaliados pode ser observada na Figura 7.

Tabela 5- Diretiva 98/83/CE-EPA-Regulamentos Nacionais de Água Potável Primária, 40 CFR Part 141 e Portarias MS nº 05/2017 e nº 888/2021

Ex.	Cloro Residual Livre (mg L ⁻¹) VMP ⁽¹⁾ 5 mg L ⁻¹	pH (6,0 a 9,0) ⁽¹⁾	Cor aparente (uH) VMP ⁽¹⁾ 15 uH	Turbidez (UNT) VMP 0,5 UT*
1	0,5	7,3	45,2	36,1
2	0,5	7,4	10,5	4,66
3	0,5	7,4	10,1	2,84
4	10	7,3	14,5	3,12
5	0,5	7,2	6,4	1,43
6	1	7,2	7,1	1
7	1	7,2	9,5	0,56
8	1	7,2	9,7	0,38
9	1	7,1	6,5	0,37
10	0,5	7,0	9,9	0,28
11	1	6,9	10,5	0,26
12	1	6,9	11,2	0,27
13	1	6,8	9,8	0,28
14	0,5	6,7	9	0,31
15	0,5	6,7	6,1	0,54
16	1	6,7	12	0,39
17	1	6,6	11,6	0,28
18	1	6,5	4,3	0,34
19	1	6,5	2,6	0,25
20	1	6,5	6	0,19
21	1	6,5	5,6	0,19
22	1	6,5	6,8	0,73
23	1	6,5	16,7	0,17
24	1	6,3	9,2	0,32

Nota: Experimento (Ex.); Portaria Nº 888/2021 do Ministério da Saúde (1); (*) Conforme Anexo 2 Portaria Nº 888/2021 do Ministério da Saúde para águas submetidas a tratamento por filtração rápida (*). Unidade de Hazen (uH); Unidade nefolométrica de turbidez (UNT); Miligrama por litro (mg L⁻¹).

Figura 7-Variabilidade dos parâmetros avaliados ao longo do tratamento pelo RLFC.



Nota: Água clarificada (AC); Água tratada por ciclo completo (ATCC); Cor aparente (A); Turbidez (B); pH (C); Condutividade Elétrica (D); Cloro livre (E); Alcalinidade (F).

Os resultados dos parâmetros físico-químicos indicaram uma boa eficiência do RLFC, visto que a maioria dos parâmetros se manteve em conformidade com os valores máximos permitidos na legislação durante toda a operação.

Considerando AC e ATCC ao longo do tratamento pelo RLFC foi observada para a alcalinidade, reduzida variação de valores (40 - 80 mg L⁻¹), efeito contrário do observado para

a condutividade elétrica, onde a variação ficou entre 186,63 e 855,7 $\mu\text{S cm}^{-1}$, sendo o maior valor atribuído a primeira amostragem de ATCC. Embora a alcalinidade não seja um parâmetro obrigatório no monitoramento de potabilidade da água, sua mensuração ajuda a controlar variações de pH, e é fundamental para os processos que envolvem as reações de coagulação. Além disso, existe uma tendência de corrosiva em valores mais baixos de alcalinidade [41]. Considerando o RLFC, esse tipo de tendência deve ser monitorada para minimização de possíveis incrustações prejudiciais decorrentes de reações com o material metálico que compõem toda estrutura do reator.

O início da operação do RLFC propiciou um aumento da condutividade elétrica nas primeiras amostragens devido a interação entre o meio filtrante e a água, acrescido este também foi observado por Souza *et al.* (2023) [42] com a investigação de um filtro de areia com carvão ativado originado a partir do caroço de açaí. A condutividade elétrica possui relação com a capacidade da eletricidade fluir na água, em geral costuma manter-se constante ao longo do tempo, dessa forma possíveis alterações são indícios de reações químicas com a água e o meio que onde se encontra [43].

Quando comparada com AC, para cor aparente a ATCC não sofreu alterações significativas na primeira amostragem (AC: 44,2 uH; ATCC: 45,2uH), enquanto que, a turbidez sofreu um acréscimo considerável após a primeira passagem de água pelo RLFC (AC: 3,35 UNT; ATCC: 36,1 UNT). Esse acréscimo deve ser atribuído a etapa de ambientação do filtro, onde ocorre o carregamento de partículas finas, especialmente da camada de CAG que possui menor barreira física devido ao tamanho médio de partícula (1,18 mm), dificultando a retenção das partículas mais finas [44].

A eficiência da desinfecção foi baseada considerando a ATCC, onde testes coliformes totais e *Escherichia coli* foram realizados, bem como a mensuração da dosagem de cloro neste ponto. Os resultados indicaram ausência tanto de coliformes totais como de *Escherichia coli*, após o tratamento completo, evidenciando a eficiência do processo de desinfecção. Entretanto, uma dosagem acima do valor máximo permitido pelas Portarias nº 5/2017 e nº 888/2021 do Ministério da Saúde foi observada, esse fato pode ser atribuído a qualidade do método de mensuração, baseado no método colorimétrico, a qual apresenta um erro associado maior, pois depende diretamente da percepção visual do analista.

O monitoramento contínuo do cloro em estações de tratamento de água demanda de sensores que exigem manutenção, limpeza e calibração frequentes, sendo inviável para sistemas de distribuição localizados em comunidades remotas. Como forma de aprimoramento do monitoramento de cloro, estudos com métodos alternativos e econômicos para prever os níveis

de cloro livre na água potável usando eletrodos de grafite revestidos com biofilmes microbianos cultivados naturalmente foram propostos por Saboe *et al.* (2021) [45], os resultados são promissores para garantia das análises, especialmente pela precisão que é possível atingir, com um erro absoluto médio de $\pm 0,09$ ppm abaixo de 1,1 ppm e $\pm 0,30$ ppm entre 1,1 e 2,7 ppm.

Apesar de investigar uma configuração diferente, a comparação dos resultados de atendimento aos valores máximos permitidos pelas Portarias nº 5/2017 e nº 888/2021 do Ministério da Saúde, entre a pesquisa atual e estudos anteriores foram semelhantes [26], fortalecendo o potencial de tratamento pelo RLFC para garantir a potabilidade da água tratada. Ressalta-se que resultados foram ainda mais promissores na configuração proposta neste estudo, especialmente pela aplicação da clarificação como pré-tratamento que permite a entrada de água no RLFC com características mais adequadas ao processo de filtração, garantindo maiores taxas operacionais. Além disso, o incremento da etapa de desinfecção propiciou o tratamento completo da água superficial investigada.

A investigação de sistemas descentralizados é benéfica para muitas populações, especialmente aqueles que contemplam soluções simples, de fácil implementação e baixo custo e corrobora ao estudo realizado por García-Ávila *et al.* (2024) [46], que investigou um sistema de filtragem de alta taxa em vários estágios como uma alternativa para o abastecimento de água potável em áreas remotas. O sistema era composto de cinco colunas com diâmetro de 110 mm e altura de 2 m, utilizando cascalho, quartzo, areia grossa, areia fina e antracito. Os testes foram divididos em filtração sem coagulação prévia e filtração com coagulação prévia usando Policloreto de Alumínio. Os resultados indicam maior eficiência com a aplicação do processo de coagulação. Além disso, o tratamento indicou alta capacidade para suprir as demandas de lares e comunidades remotas sem acesso a sistemas de tratamento de água.

Para além disto, é importante considerar que os resultados de potabilização obtidos com a aplicação do RLFC são promissores para aplicação no meio rural, suprimindo a lacuna existente e conduzindo para avanços no cenário de cobertura universal do abastecimento de água no país. Cabe ressaltar que ainda, que o Brasil não se encontra em uma situação relativamente favorável para atingir o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6, de garantia ao acesso universal e equitativo à água potável e ao saneamento básico, da Agenda 2030, e que ainda existem grandes desafios para a universalização do saneamento básico no País. Entre os desafios, destaca-se a minimização das deficiências de sistemas de tratamento e abastecimento no meio rural. Onde, para a busca da universalização faz-se necessário a implementação de políticas públicas e prestação de serviços diferentes do meio urbano, considerando os interesses locais, a

participação direta da comunidade, bem como o avanço em termos de tecnologias passíveis de aplicação em sistemas de tratamento unifamiliar ou para comunidades [47].

3.2.1 Análise estatística do RLFC

O teste estatístico de Shapiro-Wilk indicou que os dados observados neste estudo não seguem distribuição normal no comparativo de eficiência do RLFC, comparando AC e ATCC. Assim, o teste de Wilcoxon foi aplicado, os resultados para cada parâmetro estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6-Relação estatística da eficiência de tratamento do RLFC.

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Variância	p-valor
Cloro AC	0,4167	0,1903	0,04	0,000089
Cloro ATCC	1,2292	1,8823	3,54	
Alcalinidade AC	56,6667	18,3366	336,23	0,289588
Alcalinidade ATCC	50,0000	17,693	313,04	
pH AC	6,1463	0,1017	0,01	0,000018
pH ATCC	6,9131	0,3455	0,12	
Condutividade elétrica AC	177,4658	20,9882	440,51	0,00003
Condutividade elétrica ATCC	249,0100	148,0702	21924,78	
Cor aparente AC	37,5333	3,9642	15,71	0,000021
Cor aparente ATCC	10,4500	8,0529	64,85	
Turbidez AC	2,2804	3,2096	10,3	0,052034
Turbidez ATCC	2,3025	7,286	53,09	

Nota: Água clarificada (AC): Água tratada por ciclo completo (ATCC).

Os resultados apresentados na Tabela 6, indicaram que ocorreram diferenças estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$) para os parâmetros: cloro, pH, condutividade elétrica, cor aparente e turbidez quando considerado a AC e a ATCC. Para a alcalinidade não ocorreram diferenças estatisticamente significativas ($p > 0,05$) entre a AC e a ATCC, fato que pode ser atribuído a baixa variação observada (40 - 80 ppm).

Os valores observados para cor aparente e turbidez foram significativos ($p \leq 0,05$) em termos de remoção, comportamento esperado e que indica o bom desempenho do RLFC, visto que são parâmetros norteadores da eficiência do tipo de filtro de camada dupla estudado.

Para a dosagem de cloro a diferença significativa ($p = 0,000089$) é atribuída a etapa de cloração acoplado ao final do tratamento, sendo esta fundamental para qualquer tipo de sistema

de tratamento de água. Embora a dosagem de cloro ATCC esteja em acordo com os valores máximos permitidos nas Portarias nº 5/2017 e nº 888/2021 do Ministério da Saúde, com completa inativação de microrganismos observada, é necessário para completa otimização a aferição e o controle de dosagem, afim de se evitar valores em discordância com o estabelecidos no padrão de potabilidade da água.

A mensuração da dosagem de cloro é fundamental pois além de garantir a inativação de patógenos permite o controle da formação de subprodutos decorrentes da reação entre a matéria orgânica, não removida em processos anteriores, com o cloro. Para minimizar a formação dos subprodutos, o uso de estratégias capazes de diminuir com eficiência a matéria orgânica presente, como a filtração e a coagulação [48], pode ser considerada uma alternativa promissora. Tal fato reforça a importância da combinação de tecnologias no tratamento de águas destinadas ao abastecimento público, especialmente em áreas rurais onde tradicionalmente é realizada apenas a etapa de desinfecção, sendo esta, por vezes ainda negligenciada.

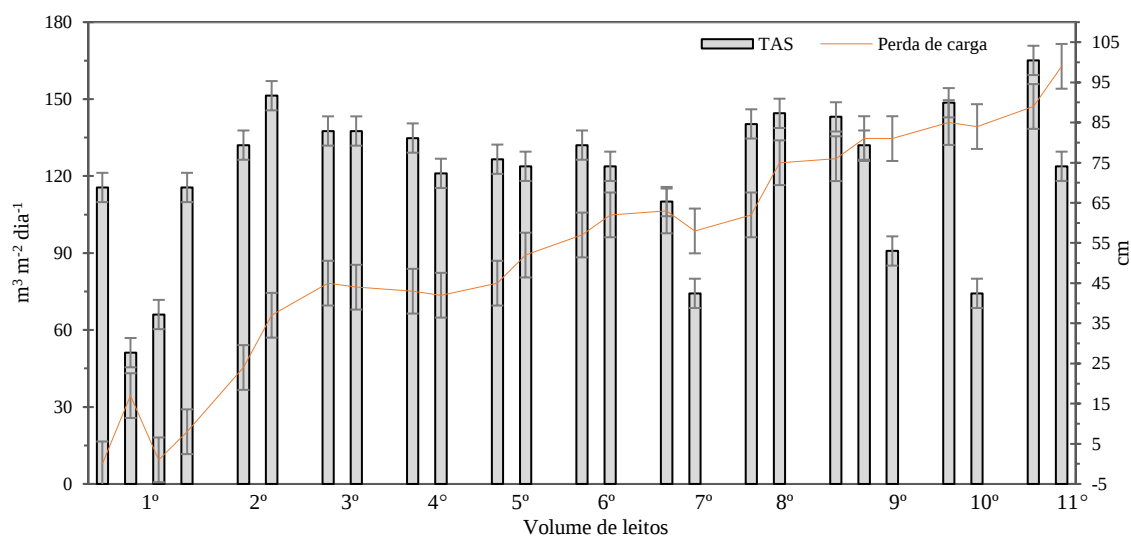
O processo de desinfecção é seguro, entretanto deve ser conduzido de forma criteriosa, especialmente ao que diz ao tipo de agente desinfetante utilizado e a dosagem do mesmo, visto que este tipo de sistema costuma produzir subprodutos devido a reação com compostos presentes na água que não foram removidos em etapas anteriores de tratamento [49].

A análise estatística demonstrou diferenças significativas entre a água tratada e a não tratada, o que, somado ao atendimento aos parâmetros de potabilidade estabelecidos pela Diretiva 98/83/CE, EPA - Regulamentos Nacionais de Água Potável Primária, 40 CFR Parte 141 e Portarias MS nº 05/2017 e nº 888/2021 após o tratamento utilizado, reforça a confiabilidade da água tratada, garantindo que o processo utilizado tenha relação positiva na minimização de possíveis danos ao abastecimento de água potável. Além disso, permite o entendimento de possíveis alterações que o CFBR pode exigir para sua completa otimização, considerando as condições operacionais e de leito utilizadas.

3.2.2 Comportamento hidráulico do RLFC

Considerando a operação do RLFC compreendeu uma utilização de aproximadamente onze volumes de leito, cerca de 0,31568 m³ de água coagulada, o comportamento hidráulico do RLFC para cada volume de leito aplicado em relação a perda de carga e TAS durante toda a operacionalização pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Comportamento hidráulico do RLFC em relação a perda de carga e TAS.



Nota: Taxa de aplicação superficial (TAS).

Conforme Figura 8, a evolução da perda de carga no RLFC seguiu um comportamento similar a TAS durante toda a operação. A maior perda de carga foi observada durante o consumo do décimo primeiro volume de leito, atingindo um valor de 99 cm. Em igual volume de leito, a TAS de aplicação correspondeu a $165,09 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, sendo também o maior valor aplicado. Considerando a operação em vazão constante buscou-se manter a TAS mais próxima a $120 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, dessa forma, o ajuste permitiu observar uma variação de $51,18 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ (primeiro volume de leito) a $165,09 \text{ m}^3 \text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ (décimo primeiro volume de leito).

A perda de carga representa a diferença de pressão absoluta na entrada e saída do filtro com base na retenção de impurezas nos espaços vazios do meio poroso, resultando na resistência ao escoamento. Para filtros em vazão constante ressalta-se ainda a variação de pressão ao longo da operação, visto que a perda de carga aumenta progressivamente com a colmatação do filtro nestas condições [50]. Dessa forma, por possuir relação direta com o acúmulo de impurezas, a perda de carga também influencia a remoção de cor aparente e turbidez.

Durante toda a operação, a maior remoção de cor aparente (91% correspondente a 2,6 uH) foi observada ao nono volume de leito, para este momento a perda de carga atingiu um valor de 81cm. Ressalta-se ainda que conforme observado na Figura 8, após este ponto a perda de carga passa a aumentar rapidamente, atingindo seu valor máximo no décimo primeiro volume de leito. Para a turbidez, a maior remoção (98,49% correspondente a 0,26 UNT), pode

ser observada ao quinto volume de leito, neste momento a perda de carga seguiu um comportamento similar, crescendo 5 cm em relação a amostragem anterior.

Hoko, Musima e Mapenzauswa (2023) [51] investigaram a aplicação de filtros de dupla camada (antracito-areia de sílica) em substituição a filtros de camada simples (areia de sílica), utilizando a aplicação de filtros pilotos. Os resultados obtidos apresentaram comportamento similar com o observado, especialmente ao que diz respeito aos parâmetros físico-químicos avaliados (condutividade elétrica, pH, sólidos dissolvidos totais, turbidez e temperatura) que não apresentaram diferenças significativas com a alteração da composição da camada filtrante. Entretanto, para os aspectos operacionais uma melhoria significativa foi observada, onde para o filtro de camada simples a perda de carga atingiu um valor de 247,3 m em comparação com 134,6 m para o filtro de camada dupla, aumentando o tempo de funcionamento e produção do filtro. Esse comportamento segue o esperado para filtros de camada dupla que seguem a configuração carvão-areia, pois a filtração em granulometria grossa para fina permite maior dispersão dos sólidos ao longo do leito, diminuindo o acúmulo na superfície que leva a colmatação mais rápida.

A configuração de filtração estudada para o RLFC não é comumente utilizada, visto que a maioria das aplicações de filtração em camada dupla seguem utilizando carvão-areia [17]. Entretanto, os resultados observados foram promissores dada a eficiência de remoção de parâmetros físico-químicos e condições operacionais que o sistema atingiu.

Ressalta-se que em filtros rápidos a eficiência operacional depende diretamente da adequação dos sistemas de lavagem, sendo a retrolavagem é amplamente utilizada para potencializar o tempo de operação do filtro sem danos a qualidade da água tratada. Na retrolavagem um volume de água ou ar passa a ser bombeado por meio de bocais perfurados (comercialmente conhecidos como crepinas) em fluxo inverso ao de filtração, promovendo a fluidização do meio e desprendimento das partículas [52].

Ainda, o uso de acessórios na saída dos filtros, como as crepinas, potencializam a eficiência de tratamento e limpeza dos filtros, visto que impedem especialmente a turbulência inadequada do meio filtrante durante a retrolavagem, e movimentação indesejada de partículas, diminuindo a formação de canais preferenciais e entupimentos [53].

3.3.3 Avaliação geral do sistema empregado

Os resultados de avaliação geral do sistema empregado que contemplam as etapas 1 e 2 são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2-Avaliação geral do RLFC em comparação com os parâmetros hidráulicos e físico-químicos entre AC e ATCC.

Resultados hidráulicos		Resultados físico-químicos											
TAS (m ³ m ⁻² dia ⁻¹)	Perda de carga (cm)	Cloro livre (ppm)		Alcalinidade (ppm)		pH		Condutividade (μS cm ⁻¹)		Cor Aparente (uH)		Turbidez (UNT)	
		AC	ATCC	AC	ATCC	AC	ATCC	AC	ATCC	AC	ATCC	AC	ATCC
115,56	0												
51,17	17	0	0,5	40	80	5,82	7,36	177,14	855,7	44,2	45,2	3,35	36,1
66,03	1	0	0,5	80	80	5,92	7,43	184,24	503,9	28,5	10,5	1,52	4,66
115,56	8	0	0,5	40	80	6,01	7,48	180,68	343,8	33,1	10,1	1,22	2,84
132,07	24	0	10	40	80	6,05	7,32	181,99	318,6	39	14,5	1,29	3,12
151,33	37	0,5	0,5	80	80	6,1	7,23	177,26	253,5	41	6,4	1,57	1,43
137,57	45	0,5	1	40	40	6,11	7,23	177,34	224,7	38,7	7,1	1,34	1
137,57	44	0,5	1	40	40	6,11	7,26	182,54	210,6	39,7	9,5	1,79	0,56
134,82	43	0,5	1	80	40	6,17	7,2	182,97	200	41	9,7	1,5	0,38
121,07	42	0,5	1	40	40	6,18	7,10	183,86	194,8	40,1	6,5	1,51	0,37
126,57	45	0,5	0,5	40	40	6,21	7,02	79,92	195,45	40,3	9,9	2,31	0,28
123,82	52	0,5	1	40	40	6,2	6,98	190,17	183,63	32,8	10,5	17,2	0,26
132,07	57	0,5	1	80	80	6,2	6,94	184,47	188,92	41,5	11,2	1,34	0,27
123,82	62	0,5	1	40	40	6,19	6,86	181,04	195,08	41,6	9,8	1,44	0,28
110,06	63	0,5	0,5	60	40	6,19	6,79	180,39	192,97	38,8	9	2,08	0,31
74,29	58	0,5	0,5	80	40	6,20	6,75	180,39	193,6	41,5	6,1	1,63	0,54
140,33	62	0,5	1	60	40	6,20	6,71	183,48	192,76	36,6	12	1,62	0,39
144,45	75	0,5	1	60	40	6,19	6,63	184,45	194,73	36,5	11,6	1,47	0,28
143,08	76	0,5	1	40	40	6,19	6,58	184,28	188,51	35,5	4,3	1,47	0,34
132,07	81	0,5	1	80	40	6,2	6,55	182,24	187,33	31,4	2,6	1,43	0,25
90,80	81	0,5	1	80	40	6,20	6,54	181,29	190,74	38,6	6	1,43	0,19
148,58	85	0,5	1	60	40	6,2	6,53	179,47	192,32	37,7	5,6	2,03	0,19
74,29	84	0,5	1	40	40	6,2	6,53	177	193,15	35,3	6,8	1,5	0,73
165,09	89	0,5	1	80	40	6,21	6,5	181,02	189,97	36,7	16,7	1,31	0,17
123,82	99	0,5	1	40	40	6,21	6,34	181,55	191,48	30,7	9,2	1,38	0,32

Nota: Taxa de aplicação superficial (TAS); Parte por milhão (ppm); Unidade de Hazen (uH); Unidade Nefolométrica de Turbidez (UNT).

Conforme apresentado no Quadro 2, a coagulação na etapa inicial de clarificação da água bruta e a configuração de leito investigada para o RLFC indicou uma alta capacidade de tratamento para água superficial mantendo-se em acordo os padrões de potabilidade. Além disso, a investigação de tecnologias consolidadas na nova configuração operacional, o RLFC, propiciou resultados auspiciosos para aplicação em comunidades rurais desassistidas por companhias de saneamento, podendo ser usada como possibilidade para garantir a participação da comunidade no gerenciamento seguro da água potável, visto que a configuração pode ser facilmente mantida com as habilidades locais, necessitando apenas de treinamentos básicos.

Em termos de comparação com estudos anteriores, esta configuração de tratamento no RLFC, combinando um tratamento preliminar de clarificação, nova configuração de leito em

coluna ampliada, indicou maior capacidade de tratamento, especialmente em termos hidráulicos. Chiquim *et al.* (2024) [25] indicaram taxas de aplicação superficial para o tratamento de água superficial no RLFC entre 59,36 e 76,17 m³ m⁻² d⁻¹, enquanto na nova configuração manteve-se taxas próximas, ou até superiores, de 120 m³ m⁻² dia⁻¹, conforme recomendado para filtros rápidos pela ABNT NBR n° 12.216:1992. Ressalta-se que estudos anteriores no RLFC não empregaram a etapa de clarificação, sendo essa etapa conveniente para o melhor funcionamento do RLFC, conforme o observado. Isto porque, o uso da clarificação proporcionou uma grande redução de partículas presentes na água bruta, conforme eficiência observada para remoção de turbidez em todas as amostragens de AC (Quadro 2), permitindo que o RLFC operasse em maiores taxas sem riscos de entupimento do meio filtrante, garantindo maiores carreiras de filtração.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou investigar a performance de um Reator de Leito Fixo Contínuo (RLFC) em dupla camada filtrante, empregando areia e CAG, pós-coagulação orgânica na potabilização da água superficial do meio rural.

No processo de clarificação usando um coagulante orgânico, os resultados indicaram um bom ajuste do modelo proposto pelo planejamento experimental, com confiabilidade de 95% para remoção de cor aparente e turbidez após a aplicação das condições ótimas das variáveis independentes: dosagem de coagulante de 0,83 mL L⁻¹, agitação de 245 RPM e 10 min de tempo de contato. Nestas condições, o processo foi capaz de atingir uma remoção de aproximadamente 52% de cor aparente e 47% de turbidez, tornando, portanto, a água superficial adequada para a aplicação em dupla camada filtrante no RLFC.

A configuração estudada para o CFBR demonstrou ser satisfatória pós-coagulação orgânica para a potabilização de águas superficiais em áreas rurais. Após a aplicação do tratamento de ciclo completo, que considerou os processos de coagulação, floculação, sedimentação, seguido de filtração em dupla camada de areia e GAC e desinfecção com cloro, foi possível observar remoção e variação significativas (p-valor < 0,05) dos parâmetros de qualidade avaliados, permanecendo em conformidade com os valores máximos permitidos para a potabilidade da água descritos na Diretiva 98/83/EC, EPA - Regulamentos Nacionais de Água Potável Primária, 40 CFR Part 141 e Portarias MS N° 5/2027 e N° 888/2021.

Em termos de análise estatística o tratamento pelo RLFC apresentou significância ($p < 0,05$) na variação dos parâmetros cloro livre, pH, condutividade elétrica, cor aparente e turbidez, em relação a água apenas clarificada.

Quanto aos parâmetros hidráulicos monitorados durante a operação, estes indicaram ainda um aumento na capacidade de tratamento do RLFC, comparado com estudos anteriores, atingindo uma taxa de aplicação superficial máxima de $165,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com uma perda de carga máxima de 99 cm ao fim da operação, mantendo ainda os níveis satisfatórios de remoção dos parâmetros avaliados.

Resultados promissores em relação a performance do RLFC foram identificados no tratamento de água superficial de comunidade rural desassistida por companhias de saneamento, podendo, portanto, contribuir para suprir a lacuna da fragilidade dos sistemas de tratamento de água destinados ao meio rural. Ainda, os resultados observados indicam a necessidade de testes para verificação de maiores tempos operacionais, variações de coagulantes e ensaios de retrolavagem com crepina.

REFERÊNCIAS

- [1] WHO, UNICEF. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2022: special focus on gender**. New York: [S.I.], 2023.
- [2] WOLF, J.; JOHNSTON, R. B.; AMBELU, A.; ARNOLD, B. F.; BAIN, R.; BRAUER, M.; BROWN, J.; A CARUSO, Bethany; CLASEN, Thomas; COLFORD, John M. Burden of disease attributable to unsafe drinking water, sanitation, and hygiene in domestic settings: a global analysis for selected adverse health outcomes. **The Lancet**, [S.L.], v. 401, n. 10393, p. 2060-2071, jun. 2023. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0140-6736\(23\)00458-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0140-6736(23)00458-0).
- [3] GRIGG, N. S. Water Distribution Systems: integrated approaches for effective utility management. **Water**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 524, 7 fev. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w16040524>.
- [4] MACHADO, A. V. M.; SANTOS, J. A. N.; QUINDELER, N. S.; ALVES, L. M. C. Critical Factors for the Success of Rural Water Supply Services in Brazil. **Water**, [S.L.], v. 11, n. 10, p. 2180, 19 out. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11102180>.
- [5] MA, D.; WEIR, M. H.; HULL, N. M. Fluence-based QMRA model for bacterial photorepair and regrowth in drinking water after decentralized UV disinfection. **Water Research**, [S.L.], v. 231, p. 119612, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2023.119612>.
- [6] LU, C.; ZHANG, S.; LU, C.; MA, B.; SUN, J.; YU, K.; ZHANG, W.; HU, C.; QU, J. Low-maintenance anti-scaling of nanofiltration pretreated by bipolar-induced electrolysis for decentralized water supply. **Journal Of Membrane Science**, [S.L.], v. 706, p. 122957, jul. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122957>.
- [7] VERMA, A.; YALEM, R.; SAINI, G. Use of recycled aggregates as filter support and filter media for decentralized water filtration systems. **Journal Of Engineering Research**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 1-10, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jer.2023.10.016>.
- [8] LIU, W.; YANG, Y.; LU, Z.; LI, T.; LI, X.; SUN, Y. Impact of variable hydrostatic pressure and intermittent operation on filtration performance and biofouling layer in gravity-driven membrane system for practical decentralized water supply. **Separation And Purification Technology**, [S.L.], v. 355, p. 129668, mar. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129668>.
- [9] LEIGH, N. G.; LEE, H. Sustainable and Resilient Urban Water Systems: the role of decentralization and planning. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 918, 12 fev. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11030918>.
- [10] United Nation (UN). **The United Nations World Water Development Report 2015**. France: Unesco, 2015.
- [11] KAMINSKA, G. Removal of Organic Micropollutants by Grainy Bentonite-Activated Carbon Adsorbent in a Fixed Bed Column. **Water**, [S.L.], v. 10, n. 12, p. 1791, 6 dez. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10121791>.

- [12] ALVES, A. A. A.; RUIZ, G. L. O.; NONATO, T. C. M.; PELISSARI, C.; DERVANOSKI, A.; SENS, M. L. Combined microfiltration and adsorption process applied to public water supply treatment: water quality influence on pesticides removal. **Environmental Technology**, [S.L.], v. 41, n. 18, p. 2382-2392, 5 fev. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2019.1567605>.
- [13] TAKA, A. L.; KLINK, M. J.; MBIANDA, X. Y.; NAIDOO, E. B. Chitosan nanocomposites for water treatment by fixed-bed continuous flow column adsorption: a review. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 255, p. 117398, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117398>.
- [14] KEBIR, M.; TAHRAOUI, H.; CHABANI, M.; TRARI, M.; NOUREDDINE, N.; ASSADI, A. A.; AMRANE, A.; HAMADI, N. B.; KHEZAMI, L. Water Cleaning by a Continuous Fixed-Bed Column for Cr(VI) Eco-Adsorption with Green Adsorbent-Based Biomass: an experimental modeling study. **Processes**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 363, 24 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/pr11020363>.
- [15] YAZDI, F.; SEPEHRIAN, M.; ANBIA, M. Selective removal of trace Pb(II) from water using tin dioxide nanoparticle-modified porous materials: a comprehensive study on batch, and fixed-bed column adsorption. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 64, p. 105532, jul. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105532>.
- [16] LI, J.; CAMPOS, L. C.; ZHANG, L.; XIE, W. Sand and sand-GAC filtration technologies in removing PPCPs: a review. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 848, p. 157680, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157680>.
- [17] BRATNY, J. **Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment**. London: IWA Publishing, 2016.
- [18] COELHO, E.R.C.; BREGA, R.S. Evaluation of a pilot system for removal of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and absorbance determination after clarification and adsorption on granular activated carbon. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 28, p. 1-8, 2023. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220220170>.
- [19] ALVES, A. A. A.; RUIZ, G. L. O.; NONATO, T. C. M.; MÜLLER, L. C.; SENS, M. L. Performance of the fixed-bed of granular activated carbon for the removal of pesticides from water supply. **Environmental Technology**, [S.L.], v. 40, n. 15, p. 1977-1987, 26 fev. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2018.1435731>.
- [20] ALVES, A. A. A.; LUZ, A. D.; TONES, A. R. M.; NONATO, T. C. M.; RUIZ, G. L. O.; SENS, M. L. Removal of carbamate insecticides from drinking water through a fixed bed column of granular activated carbon: a thermodynamic, kinetic and equilibrium study of multicomponent adsorption. **Desalination And Water Treatment**, [S.L.], v. 108, p. 171-182, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2018.22013>.
- [21] BACK, L. E. K. Groundwater purification in rural areas using granular activated carbon fixed bed column adsorption technology. 2018. 107 p. Monograph (Undergraduate) - Environmental and Sanitary Engineering Course, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2018.

- [22] THOMAS, J. B. Preliminary backwash process in a biflux fixed bed reactor (RLF-BF) applied to groundwater purification in rural areas. 2022. 67 p. Monograph (Undergraduate) - Environmental and Sanitary Engineering Course, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2022.
- [23] ALVES, A. A. A.; SOUZA, S.S.; FERREIRA, J.V.T.; MARTINS, R.W.; TONES, A.R.M. COMPARISON STUDY OF A BI-FLOW FIXED BED REACTOR ON A PILOT AND REAL SCALE FOR THE DRINKING OF RURAL WATER SUPPLY. In: NATIONAL CONGRESS ON SANITATION AND ENVIRONMENT, 34th, 2023, São Paulo. Proceedings [...] . São Paulo: Aesabesp, 2023. p. 1-9.
- [24] ALVES, A. A. A.; FERREIRA, J.V.T.; MARTINS, R.W.; CHIQUIM, M.S. USE OF RLF-BFC FOR THE DRINKING OF PUBLIC WATER SUPPLY IN AN AREA WITHOUT THE SERVICE OF A WATER TREATMENT COMPANY. In: NATIONAL CONGRESS ON SANITATION AND ENVIRONMENT, 34th, 2023, São Paulo. Proceedings [...] . São Paulo: Aesabesp, 2023. p. 1-9.
- [25] CHIQUIM, M. S.; AVILA, C. C.; MARTINS, R. W.; TONES, A. R. M.; SENS, M. L.; ALVES, A. A. A. Fixed bed reactors applied to potabilization of public water supply: review of the development retrospective (2013-2023). Journal Of Water Process Engineering, [S.L.], v. 68, p. 106332, dez. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106332>.
- [26] BENALIA, A.; DERBAL, K.; AMROUCI, Z.; BAATACHE, O.; KHALFAOUI, A.; PIZZI, A. Application of Plant-Based Coagulants and Their Mechanisms in Water Treatment: a review. **Journal Of Renewable Materials**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 667-698, 2024. Tech Science Press. <http://dx.doi.org/10.32604/jrm.2024.048306>.
- [27] BRAZIL. Consolidation of standards on health actions and services of the Unified Health System. Consolidation Ordinance No. 5. BRAZIL, September 28, 2017.
- [28] BRAZIL. Amends Annex XX of Consolidation Ordinance GM/MS No. 5, of September 28, 2017, to provide for procedures for controlling and monitoring the quality of water for human consumption and its potability standard. Ordinance GM/MS No. 888. Brazil, May 4, 2021.
- [29] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5667-3:2024 WATER QUALITY — SAMPLING — PART 3: PRESERVATION AND HANDLING OF WATER SAMPLES REFERENCE NUMBER ISO 5667-3:2024 EDITION 6 2024-03 % ISO 2025 ISO 5667-3:202482273 ISO 5667-3:2024**: Water quality. [S.I]: International Standard, 2024.
- [30] RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. R. Design of experiments and process optimization. 2nd ed. Campinas, São Paulo: Casa do Espirito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.
- [31] BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL STANDARDS - ABNT NBR 12216:1992. Design of water treatment plant for public supply: procedure. Rio de Janeiro, 1992. BRAZIL.
- [32] SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, [S.L.], v. 52, n. 3/4, p. 591, dez. 1965. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/2333709>.

- [33] WILCOXON, F. Individual Comparisons by Ranking Methods. **Biometrics Bulletin**, [S.L.], v. 1, n. 6, p. 80, dez. 1945. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/3001968>.
- [34] PIVOKONSKY, M.; NOVOTNA, K.; PETRICEK, R.; CERMAKOVA, L.; PROKOPOVA, M.; NACERADSKA, J. Fundamental chemical aspects of coagulation in drinking water treatment – Back to basics. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 57, p. 104660, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104660>.
- [35] THOMAS, B.; VINKA, C.; PAWAN, L.; DAVID, S. Sustainable groundwater treatment technologies for underserved rural communities in emerging economies. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 813, p. 152633, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152633>.
- [36] ZAMAN, N. K.; ROHANI, R.; YUSOFF, I. I.; KAMSOL, M.; BASIRON, S.; RASHID, A. A. Eco-Friendly Coagulant versus Industrially Used Coagulants: identification of their coagulation performance, mechanism and optimization in water treatment process. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, [S.L.], v. 18, n. 17, p. 9164, 31 ago. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph18179164>.
- [37] ADEBAYO, I. O.; OLUKOWI, O. O.; ZHIYUAN, Z.; ZHANG, Y. Comparisons of coagulation efficiency of conventional aluminium sulfate and enhanced composite aluminium sulfate/polydimethyldiallylammonium chloride coagulants coupled with rapid sand filtration. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 44, p. 102322, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102322>.
- [38] KOUL, B.; BHAT, N.; ABUBAKAR, M.; MISHRA, M.; ARUKHA, A.P.; YADAV, D. Application of Natural Coagulants in Water Treatment: a sustainable alternative to chemicals. **Water**, [S.L.], v. 14, n. 22, p. 3751, 18 nov. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w14223751>.
- [39] GARCÍA-ÁVILA, F.; RAMOS-FERNÁNDEZ, L.; ZHINDÓN-ARÉVALO, C. Estimation of corrosive and scaling trend in drinking water systems in the city of Azogues, Ecuador. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 1, 1 out. 2018. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2237>.
- [40] SOUZA, M. S.; VIANA, T. H. C.; GOUVEIA, C. L.; PETERS, L. P.; MAIA, G. B. S.; RODRIGUEZ, A. F. R. Production and application of low-cost filter with activated carbon from native açaí seed residue. **Ciência Florestal**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 1-18, Jun 28, 2023. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509871315>.
- [41] RAZMAN, N. A.; ISMAIL, W. Z. W.; RAZAK, M. H. A.; ISMAIL, I.; JAMALUDIN, J. Design and analysis of water quality monitoring and filtration system for different types of water in Malaysia. **International Journal Of Environmental Science And Technology**, [S.L.], v. 20, n. 4, p. 3789-3800, 11 jun. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-022-04192-x>.
- [42] SANTOS, P.R.; LEITE, L.S.; DANIEL, L.A. Performance of biological activated carbon (BAC) filtration for the treatment of secondary effluent: a pilot-scale study. **Journal Of**

Environmental Management, [S.L.], v. 302, p. 114026, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114026>.

[43] SABOE, D.; HRISTOVSKI, K. D.; BURGE, S. R.; BURGE, R. G.; TAYLOR, E.; HOFFMAN, D. A. Measurement of free chlorine levels in water using potentiometric responses of biofilms and applications for monitoring and managing the quality of potable water. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 766, p. 144424, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144424>.

[44] GARCÍA-ÁVILA, F.; CRIOLLO-ILLESCAS, F.; ZHINDÓN-ARÉVALO, C.; GARCÍA-UZCA, C.; DONOSO-MOSCOSO, S.; ALFARO-PAREDES, E. Integration of rapid filters for the provision of drinking water at rural home level. **Groundwater For Sustainable Development**, [S.L.], v. 26, p. 101217, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101217>.

[45] MARIOSIA, D.F.; FALSARELLA, O.M.; SIQUEIRA, G.; SILVA, A.C.F.; CONTI, D.M.; ÁLVAREZ, J.F. The challenges of universal access to water: some contributions to the sustainable management of water resources in rural areas. **Concilium**, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 140-154, 1 abr. 2024. Uniao Atlantica de Pesquisadores. <http://dx.doi.org/10.53660/clm-3147-24f22>.

[46] MAZHAR, M. A.; KHAN, N. A.; AHMED, S.; KHAN, A. H.; HUSSAIN, A.; RAHISUDDIN; CHANGANI, F; YOUSEFI, M; AHMADI, S; VAMBOL, V. Chlorination disinfection by-products in municipal drinking water – A review. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 273, p. 123159, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123159>.

[47] KOLEY, S.; DASH, S.; KHWAIRAKPAM, M.; KALAMDHAD, A.S.. Perspectives and understanding on the occurrence, toxicity and abatement technologies of disinfection by-products in drinking water. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 351, p. 119770, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119770>

[48] DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Water Treatment Methods and Techniques. 2nd ed. São Paulo: RIMA, 2005.

[49] HOKO, Z.; MUSIMA, B. T.; MAPENZAUSWA, C. F. Exploring the feasibility of dual media filtration at Morton Jaffray Water Works (Harare, Zimbabwe). **Journal Of Applied Water Engineering And Research**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 14-26, 28 mar. 2023. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/23249676.2023.2191348>.

[50] BESHR, S.; MOUSTAFA, M.; FAYED, M.; ALY, S. Evaluation of water consumption in rapid sand filters backwashed under varied physical conditions. **Alexandria Engineering Journal**, [S.L.], v. 64, p. 601-613, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2022.08.048>.

[51] SANTOS, M. B.; MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R. Application of wind tunnel in the evaluation of flow lines generated by sand filter screens. **Agricultural Engineering**, [S.L.], v. 33, n. 3, p. 548-559, Jun. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162013000300011>.

[52] APHA, AWWA, WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd ed., American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington, DC, 2012.

[53] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **98/83**: Council Directive 98/83/EC. European Union: Official Journal Of The European Communities, 1998.

[54] USEPA. **Part 141- National Primary Drinking Water Regulations**. U.S, UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2004.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa buscou investigar uma nova configuração de acomodações de leito filtrante para o RLFC para a potabilização de água superficial de uma pequena comunidade rural do interior do Rio Grande do Sul. A construção e operação do RLFC seguiu as recomendações descritas na ABNT NBR nº 12.216:1997, considerando ainda resultados de estudos similares da literatura, operações anteriores e testes preliminares nas condições investigadas.

Nesta pesquisa, utilizou-se apenas a coluna interna do RLFC, onde foi utilizado um leito de uma camada dupla formada por areia de quartzo e CAG, o tratamento foi precedido de tratamento de clarificação com o uso de coagulante orgânico. A operação do RLFC foi baseada no consumo de onze volumes de leito, considerando o volume da coluna interna sem preenchimento utilizada, controle da taxa de aplicação superficial a mais próxima de $120 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e atingimento perda de carga máxima antes do transbordo (1,14 m).

O trabalho foi dividido em duas etapas: a primeira compreendeu a etapa de clarificação utilizando um coagulante orgânico e a segunda o tratamento no RLFC, onde foi acoplado ao final do processo um dosador de cloro para a realização da desinfecção final da água tratada, dessa forma a operação contemplou todas as etapas fundamentais para a potabilização de água.

Os resultados observados para a primeira etapa indicaram um bom ajuste das variáveis independentes, onde foi possível observar uma remoção de aproximadamente 52% de cor aparente e 47% de turbidez, sob condições ideais de $0,83 \text{ mL L}^{-1}$ de dosagem de coagulante, 245 RPM de velocidade de agitação e 10 min de tempo de contato. Estas condições propiciaram a aplicação da filtração granular no RLFC.

A operacionalização do RLFC pós-coagulação orgânica mostrou-se promissora para a potabilização de água superficial do meio rural, garantindo após o tratamento a conformidade com os valores máximos permitidos para potabilidade de água descritos nas Portarias MS Nº 5/2017 e Nº 888/2021. A análise estatística indicou ainda diferença significativa ($p < 0,05$) dos parâmetros cloro livre, pH, condutividade elétrica, cor aparente e turbidez, considerando a água tratada por ciclo completo (clarificação, filtração no RLFC e desinfecção) e a água apenas clarificada.

A nova configuração investigada mostrou-se promissora para o tratamento de água superficial, sendo uma alternativa para suprir a lacuna da fragilidade ou inexistência dos sistemas de tratamento de água no meio rural. Entretanto, para melhor elucidação do desempenho do RLFC, recomenda-se a aplicação de novos ensaios experimentais voltados,

incluindo testes de retrolavagem, implementação da automação para controle de válvulas e aplicação a campo do RLFC.

REFERÊNCIAS

- ACHORE, M.; BISUNG, E.; KUUSAANA, E. D. Coping with water insecurity at the household level: a synthesis of qualitative evidence. *International Journal Of Hygiene And Environmental Health*, [S.L.], v. 230, p. 113598, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113598>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **ATLAS ÁGUAS: segurança hídrica do abastecimento urbano**. Brasília: Ana, 2021.
- AHMED, T.; ZOUNEMAT-KERMANI, M.; SCHOLZ, M. Climate Change, Water Quality and Water-Related Challenges: a review with focus on pakistan. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, [S.L.], v. 17, n. 22, p. 8518, 17 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17228518>.
- ALVES, A. A. A; RUIZ, G. L. O; NONATO, T. C. M.; MÜLLER, L. C.; SENS, M. L. Performance of the fixed-bed of granular activated carbon for the removal of pesticides from water supply. **Environmental Technology**, [S.L.], v. 40, n. 15, p. 1977-1987, 26 fev. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2018.1435731>.
- AL-WASIFY, R. S.; HAMED, S. R.; RAGAB, S. Assessing the potential of de-oiled peanut (*Arachis hypogaea*) seeds for surface water treatment: a sustainable alternative to chemical coagulants. **The Egyptian Journal Of Aquatic Research**, [S.L.], v. 49, n. 3, p. 297-302, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejar.2023.04.003>.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). **Standard Practice for the Prediction of Contaminant Adsorption On GAC In Aqueous Systems Using Rapid Small-Scale Column Tests**. West Conshohocken (PA): ASTM; 2014. Standard N° D6586-03: 2014.
- ANDERSON, Lindsay E.; TCHONLLA, Manda; EARLE, Martin; SWINAMER, Ryan; GAGNON, Graham A.. Adapting direct filtration to increasing source water dissolved organic carbon using clarification and granular activated carbon. **Awwa Water Science**, [S.L.], v. 5, n. 5, p. 1-15, set. 2023. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/aws2.1352>.
- ANG, W. L.; MOHAMMAD, A.W.. State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 262, p. 121267, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121267>.
- ARENAS, L. R.; GENTILE, S. R.; ZIMMERMANN, S.; STOLL, S. Nanoplastics adsorption and removal efficiency by granular activated carbon used in drinking water treatment process. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 791, p. 148175, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148175>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT NBR 12216:1992**: Projeto estação de tratamento de água para abastecimento público: procedimento. Rio de Janeiro, 1992. BRASIL.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. Estabelece o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento: NBR nº 7181. Brasil, 29 set. 2016.

BACK, L. E. K. **Potabilização de águas subterrâneas em área rural por meio da tecnologia de adsorção em coluna de leito fixo de carvão ativado granular**. 2018. 107 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2018.

BENALIA, A; DERBAL, K; AMROUCI, Z; BAATACHE, O; KHALFAOUI, A; PIZZI, A. Application of Plant-Based Coagulants and Their Mechanisms in Water Treatment: a review. **Journal Of Renewable Materials**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 667-698, 2024. Tech Science Press. <http://dx.doi.org/10.32604/jrm.2024.048306>.

BESHR, S.; MOUSTAFA, M.; FAYED, M.; ALY, S. Evaluation of water consumption in rapid sand filters backwashed under varied physical conditions. **Alexandria Engineering Journal**, [S.L.], v. 64, p. 601-613, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2022.08.048>.

BEZERRA, M. A; SANTELLI, R. E; OLIVEIRA, E. P; VILLAR, L. S; ESCALEIRA, L. A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. **Talanta**, [S.L.], v. 76, n. 5, p. 965-977, 15 set. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>.

BOTARI, A.; DI BERNARDO, L. Modelação matemática macroscópica da perda de carga e da remoção de sólidos suspensos totais na filtração direta ascendente. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 149-159, jun. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522007000200006>.

BRASIL. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Portaria GM/MS Nº 888**. Brasil, 4 maio 2021.

BRASIL. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. **Portaria de Consolidação Nº 5**. BRASIL, 28 set. 2017.

BRASIL. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Resolução Conama Nº 357. Diário Oficial da União, 18 mar. 2005.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto - 2022. Brasília: SNIS, 2022.

CESCON, A.; JIANG, J. Q. Filtration Process and Alternative Filter Media Material in Water Treatment. **Water**, [S.L.], v. 12, n. 12, p. 3377, 1 dez. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12123377>.

CHAÚQUE, B. J. M.; BRANDÃO, F. G.; ROTT, M. B. Development of solar water disinfection systems for large-scale public supply, state of the art, improvements and paths to the future – A systematic review. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 107887, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2022.107887>.
CHEN, Qi; LI, Guiwei; LU, Zhili; SU, Yuliang; WU, Bin; SHI, Baoyou. Efficient Mn(II) removal by biological granular activated carbon filtration. **Journal Of Hazardous Materials**,

[S.L.], v. 458, p. 131877, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131877>.

CHIQUEIM, M. S. **DESEMPENHO DE UM REATOR DE LEITO FIXO CONTÍNUO: DUPLA FILTRAÇÃO EM AREIA E CARVÃO ATIVADO GRANULAR PARA POTABILIZAÇÃO DE ÁGUA**. 2024. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2024.

CHIQUEIM, M.S; AVILA, C.C; MARTINS, R.W; TONES, A.R.M; SENS, M.L; ALVES, A.A.A. Fixed bed reactors applied to potabilization of public water supply: review of the development retrospective (2013-2023). **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 68, p. 106332, dez. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106332>.

COSTA, T. C.; HENDGES, L. T.; TEMOCHKO, B.; MAZUR, L.P.; MARINHO, B. A.; WESCHENFELDER, S. E.; FLORIDO, P. L.; SILVA, A.; SOUZA, A. A. U.; SOUZA, S. M. A. Evaluation of the technical and environmental feasibility of adsorption process to remove water soluble organics from produced water: a review. **Journal Of Petroleum Science And Engineering**, [S.L.], v. 208, p. 109360, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109360>.

COUSO-PÉREZ, S.; ABELEDO-LAMEIRO, M. J.; VIDAL-VARELA, A.I. ; GÓMEZ-COUSO, H. Removal of the waterborne parasite *Cryptosporidium parvum* from drinking water using granular activated carbon. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 11, n. 6, p. 111185, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2023.111185>.

DAYARATHNE, H. N. P; ANGOVE, M. J.; ARYAL, R.; ABUEL-NAGA, H.; MAINALI, B. Removal of natural organic matter from source water: review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 40, p. 101820, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101820>.

DERRINGER, G., SUICH, R. **Simultaneous optimization of several response variables**. **Journal of Quality Technology**, v.12:4, p. 214-219, 1980. Doi: <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1993.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2 ed. São Paulo: RIMA, 2005.

DINIZ, J. F.; SANTOS, W. J. S. Segurança hídrica e o desafio do abastecimento de água brasileiro. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [S.L.], p. 05-26, 8 nov. 2022. Revista Científica Multidisciplinar Nucleo Do Conhecimento. <http://dx.doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/seguranca-hidrica>.

DONG, H.; XU, L.; MAO, Y.; WANG, Y.; DUAN, S.; LIAN, J.; LI, J.; YU, J.; QIANG, Z. Effective abatement of 29 pesticides in full-scale advanced treatment processes of drinking water: from concentration to human exposure risk. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 403, p. 123986, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123986>.

DOTTO, G. L.; MCKAY, G. Current scenario and challenges in adsorption for water treatment. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 103988, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2020.103988>.

FAROUK, M. I. H. Z.; JAMIL, Z.; LATIP, M. F. A. Towards online surface water quality monitoring technology: a review. **Environmental Research**, [S.L.], p. 117147, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2023.117147>.

FAUSTINO, N. C. **ALTERNATIVAS DE PRÉ-OXIDAÇÃO ClO₂/H₂O₂/NaClO COMBINADAS COM ULTRASSOM PARA MINIMIZAÇÃO DE SUBPRODUTOS EM ÁGUAS SUPERFICIAIS**. 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Tecnologia, Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2016.

FERETTI, D.; ACITO, M.; DETTORI, M.; CERETTI, E.; FATIGONI, C.; POSADINO, S.; ZERBINI, I.; VILLARINI, M.; MORETTI, M.; CASTIGLIA, P. Genotoxicity of source, treated and distributed water from four drinking water treatment plants supplied by surface water in Sardinia, Italy. **Environmental Research**, [S.L.], v. 185, p. 109385, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2020.109385>.

FERREIRA, D. C.; GRAZIELE, I.; MARQUES, R. C.; GONÇALVES, J. Investment in drinking water and sanitation infrastructure and its impact on waterborne diseases dissemination: the brazilian case. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 779, p. 146279, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146279>.

FUJIOKA, T.; NGO, M. T. T.; MAKABE, R.; UEYAMA, T.; TAKEUCHI, H.; NGA, T. T. V.; BUI, X. T.; TANAKA, H. Submerged nanofiltration without pre-treatment for direct advanced drinking water treatment. **Chemosphere**, [S.L.], v. 265, p. 129056, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129056>.

GARCÍA-ÁVILA, F.; CRIOLLO-ILLESCAS, F.; ZHINDÓN-ARÉVALO, C.; GARCÍA-UZCA, C.; DONOSO-MOSCOSO, S.; ALFARO-PAREDES, E. Integration of rapid filters for the provision of drinking water at rural home level. **Groundwater For Sustainable Development**, [S.L.], v. 26, p. 101217, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101217>.

GHISI, D. B. **Análise hidráulica de um filtro rápido bifluxo em escala piloto de dupla camada filtrante com descarga de fundo intermediária para tratamento de água de abastecimento**. 2019. 203 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

GRAY, Nick. **Water Technology**. London: Crc Press, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781315276106>. Acesso em: 22 out. 2024.

HAIROM, N. H. H.; SOON, C. F.; MOHAMED, R. M. S. R.; MORSIN, M.; ZAINAL, N.; NAYAN, N.; ZULKIFLI, C. Z.; HARUN, N. H. A review of nanotechnological applications to detect and control surface water pollution. **Environmental Technology & Innovation**, [S.L.], v. 24, p. 102032, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2021.102032>.
HASAN, H. A.; MUHAMMAD, M. H.; ISMAIL, N.I. A review of biological drinking water treatment technologies for contaminants removal from polluted water resources. **Journal Of**

Water Process Engineering, [S.L.], v. 33, p. 101035, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101035>.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**. Características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

IKHLAQ, A.; QAZI, U. Y; AKRAM, A.; RIZVI, O. S.; SULTAN, A.; JAVAID, R.; AL-SODANI, K. A. A.; SHAMSAH, S. M. I. Potable Water Treatment in a Batch Reactor Benefited by Combined Filtration and Catalytic Ozonation. **Water**, [S.L.], v. 14, n. 15, p. 2357, 30 jul. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w14152357>.

JIANG, J. Q. The role of coagulation in water treatment. **Current Opinion In Chemical Engineering**, [S.L.], v. 8, p. 36-44, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coche.2015.01.008>.

LEAL, R. V. O. CONTROLE DE QUALIDADE MICROBIOLÓGICO DA ÁGUA POTÁVEL PARA O CONSUMO HUMANO: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. **Revista Movimenta**, Goiás, v. 14, n. 3, p. 953-967, jan. 2022.

LI, J.; CAMPOS, L. C.; ZHANG, L.; XIE, W. Sand and sand-GAC filtration technologies in removing PPCPs: a review. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 848, p. 157680, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157680>.

LI, P.; WU, J. Drinking Water Quality and Public Health. **Exposure And Health**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 73-79, 4 fev. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12403-019-00299-8>.

LI, W.; ZHAN, H.; DONG, C.; WU, S.; MULCAHY, D.; DUAN, J. Detoxication of organophosphate pesticides in source waters by incorporation of an alkaline hydrolysis procedure in conventional drinking water treatment processes. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 53, p. 103917, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103917>.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Editora Átomo, 2010.

LIMA, J. P. M; ROLLEMBERG, S. L. S.. Simplified Water Treatment Techniques. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 447-460, 2020. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20200036>.

LOWE, Matthew; QIN, Ruwen; MAO, Xinwei. A Review on Machine Learning, Artificial Intelligence, and Smart Technology in Water Treatment and Monitoring. **Water**, [S.L.], v. 14, n. 9, p. 1384, 24 abr. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w14091384>.

MA, B.; ARNOLD, W. A.; HOZALSKI, R. M. The relative roles of sorption and biodegradation in the removal of contaminants of emerging concern (CECs) in GAC-sand

biofilters. **Water Research**, [S.L.], v. 146, p. 67-76, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.023>.

MARIANA, M.; H. P. S., Abdul K; MISTAR, E. M.; YAHYA, E. B.; ALFATAH, T.; DANISH, M.; AMAYREH, M. Recent advances in activated carbon modification techniques for enhanced heavy metal adsorption. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 43, p. 102221, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102221>.

MATILAINEN, A.; VEPSÄLÄINEN, M.; SILLANPAA, M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review. **Advances In Colloid And Interface Science**, [S.L.], v. 159, n. 2, p. 189-197, set. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2010.06.007>.

MELO, T. D.; ROCHA, I. L.; COSTA, T. G. A.; ABREU, L. P.; IWATA, B. F.; BEMBEM, A. A.; CÉSAR, M. O. M; SOUSA, M. C. B.; LEITE, A. C. S. Situação do sistema de abastecimento de água em comunidades rurais de Riacho Frio, Piauí. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 630-639, 10 ago. 2020. Companhia Brasileira de Produção Científica. <http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2020.007.0049>.

MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R.; RAMIREZ, J. C. S.; DE DEUS, F. P.; BIZARI, D. R. Simulação matemática da perda de carga em camadas porosas de filtros de areia. In: Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, 4., 2012, Fortaleza. Anais... Fortaleza: CENTEC, 2012, p. 2.

MOE, C. L.; RHEINGANS, R. D. Global challenges in water, sanitation and health. **Journal Of Water And Health**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 41-57, 1 jul. 2006. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wh.2006.0043>.

MONTEIRO, L. G.; CORDEIRO, R. M.; ARAGÃO, J. S.; SILVA, E. M. R.; SILVA, L. G. PERDAS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM COMUNIDADES RURAIS NA REGIÃO METROPOLITANA DO CARIRI. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 524, 17 jul. 2020. Anima Educação. <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e22020524-544>

NASCIMENTO, P. H. L. **DIMENSIONAMENTO DE FILTROS RÁPIDOS POR GRAVIDADE DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE CICLO COMPLETO**. 2019. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

NOVAES, C. G.; YAMAKI, R. T.; PAULA, V.F.; NASCIMENTO JÚNIOR, B. B.; BARRETO, J. A.; VALASQUES, G. S.; BEZERRA, M. A. Optimization of Analytical Methods Using Response Surface Methodology - Part I: process variables. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 1184-1215, 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170070>.

OLIVEIRA, C. M. Sustainable access to safe drinking water: fundamental human right in the international and national scene. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 985, 23 nov. 2017. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2037>.

OLIVEIRA, C.; TREVISAN, V.; SKORONSKI, E. Application of tannin-based coagulant for high-range turbidity surface water clarification. **Journal Of Water, Sanitation And Hygiene For Development**, [S.L.], v. 12, n. 11, p. 803-815, 18 out. 2022. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/washdev.2022.120>.

OMER, N. H. Water Quality Parameters. In: SUMMERS, Kevin (ed.). **Water Quality**. London: Intechopen, 2020. p. 2-20.

PAULINO, R.; TAMBURIC, B.; STUETZ, R. M.; ZAMYADI, A.; CROSBIE, N.; HENDERSON, R.K. Critical review of adsorption and biodegradation mechanisms for removal of biogenic taste and odour compounds in granular and biological activated carbon contactors. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 52, p. 103518, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103518>.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. São Paulo: Abes, 2006.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CERRO LARGO. **PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO 2022**. Cerro Largo. 2022.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2009.

RIVA, F.; ZUCCATO, E.; DAVOLI, E.; FATTORE, E.; CASTIGLIONI, S. Risk assessment of a mixture of emerging contaminants in surface water in a highly urbanized area in Italy. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 361, p. 103-110, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.099>.

RODRIGUES, M. I. LEMMA, A. R. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2. ed. Campinas, São Paulo: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.

RUSSO, A. C.; PIMENTEL, M. A. S.; HEMSI, P. S. Emprego do monitoramento contínuo da floculação no controle de parâmetros de tratabilidade de água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 501-507, jun. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020184285>.

SANTOS, E. P. C. C.; TEIXEIRA, A. R.; ALMEIDA, C. P.; LIBÂNIO, Marcelo; PÁDUA, Valter L. Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 361-370, dez. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522007000400002>.

SANTOS, M. B. dos; MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R. Aplicação de túnel de vento na avaliação de linhas de fluxo geradas por crepinas de filtros de areia. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 33, n. 3, p. 548-559, jun. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162013000300011>.

SCHREIBER, Fábio; DONATO, Filipe Fagan; KEMMERICH, Magali; ZANELLA, Renato; CAMARGO, Edinaldo Rabaoli; AVILA, Luis Antonio de. Efficiency of home water filters on pesticide removal from drinking water. **Environmental Pollution**, [S.L.], v. 341, p. 122936, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122936>.

SCHUMANN, P.; MUSCHKET, M.; DITTMANN, D.; RABE, L.; REEMTSMA, T.; JEKEL, M.; RUHL, A.S. Is adsorption onto activated carbon a feasible drinking water treatment option for persistent and mobile substances? **Water Research**, [S.L.], v. 235, p. 119861, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2023.119861>.

SCHURER, R.; RIDDER, D.J. de; SCHIPPERS, J.C.; HIJNEN, W.A.M.; VREDENBREGT, L.; WAL, A. van Der. Advanced drinking water production by 1 kDa hollow fiber nanofiltration – Biological activated carbon filtration (HFNF – BACF) enhances biological stability and reduces micropollutant levels compared with conventional surface water treatment. **Chemosphere**, [S.L.], v. 321, p. 138049, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138049>.

SILLANPAA, M.; NCIBI, M. C.; MATILAINEN, A.; VEPSÄLÄINEN, M. Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: a comprehensive review. **Chemosphere**, [S.L.], v. 190, p. 54-71, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.113>.

SILVA, A. B.; BRITO, J. M.; SILVA, R. A.; BRAZ, A. S.; SILVA FILHO, E. D. Parâmetros físico-químicos da água utilizada para consumo em poços artesianos na cidade de Remigio-PB. **Águas Subterrâneas**, [S.L.], v. 31, n. 2, p. 109, 6 abr. 2017. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i2.28807>.

SILVEIRA, L. M. **Estudo sobre a ocorrência de arsênio nas águas subterrâneas do sistema aquífero Serra Geral, no município de Cerro Largo – RS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SIROCIC, A. P.; OJDANIC, K.; DOGANCIC, D.; PLANTAK, L. Water Quality for Human Consumption from the Public Water Supply System. **Ecws-7 2023**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 1-21, 16 mar. 2023. MDPI. <http://dx.doi.org/10.3390/ecws-7-14230>.

SOUZA, S. S. **Reator de Leito Fixo Bi-fluxo (RLF-BF) aplicado a potabilização de água subterrânea do meio rural**. 2022. Monografia - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2022.

SULTANA, M.; ROWNOK, M.H.; SABRIN, M.; RAHAMAN, M.H; ALAM, S.M.N. A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. **Cleaner Engineering And Technology**, [S.L.], v. 6, p. 100382, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clet.2021.100382>.

SUN, S.; TANG, Q.; KONAR, M.; FANG, C.; LIU, H.; LIU, X.; FU, G. Water transfer infrastructure buffers water scarcity risks to supply chains. **Water Research**, [S.L.], v. 229, p. 119442, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2022.119442>.

SYAFRUDIN, M.; KRISTANTI, R. A.; YUNIARTO, A.; HADIBARATA, T.; RHEE, J.; AL-ONAZI, W.A.; ALGARNI, T.S.; ALMARRI, A.H.; AL-MOHAIMEED, A.M.. Pesticides in Drinking Water—A Review. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 468, 8 jan. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph18020468>.

TANG, S.; GAO, L.; TIAN, A.; ZHAO, T.; ZOU, D. The coagulation behavior and removal efficiency of microplastics in drinking water treatment. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 53, p. 103885, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103885>.

TEODOSIU, C.; GILCA, A. F.; BARJOVEANU, G.; FIORE, S. Emerging pollutants removal through advanced drinking water treatment: a review on processes and environmental performances assessment. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 197, p. 1210-1221, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.247>.

THOMAS, J. B. **Processo preliminar de retrolavagem em reator de leito fixo bifluxo (RLF-BF) aplicado a potabilização de água subterrânea do meio rural**. 2022. 67 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2022.

TLILI, I.; ALKANHAL, T. A. Nanotechnology for water purification: electrospun nanofibrous membrane in water and wastewater treatment. **Journal Of Water Reuse And Desalination**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 232-248, 24 jan. 2019. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wrd.2019.057>.

UDDIN, M. G.; NASH, S.; OLBERT, A. I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 122, p. 107218, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>.

United Nations General Assembly (UNGA). Human Right to Water and Sanitation Geneva: UNGA; 2010. **UN Document A/RES/64/292**.

USEPA – United States Environmental Protection Agency (2017). Work Breakdown Structure-Based Cost Model for Granular Activated Carbon Drinking Water Treatment. Technical Resource Document, EPA.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de engenharia sanitária e ambiental. Vol 1. 2ª edição. Belo horizonte, 1996.

WHO, UNICEF. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2022: special focus on gender**. New York: [S.I], 2023.

YUAN, J.; PASSEPORT, E.; HOFMANN, R. Understanding adsorption and biodegradation in granular activated carbon for drinking water treatment: a critical review. **Water Research**, [S.L.], v. 210, p. 118026, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2021.118026>.