



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**UTILIZAÇÃO DE EFLUENTES PRÉ-TRATADOS NA FERTIRRIGAÇÃO DE
LAVOURAS**

ANDRÉ LUIS FREITAS

UBERLÂNDIA - MG

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**UTILIZAÇÃO DE EFLUENTES PRÉ-TRATADOS NA FERTIRRIGAÇÃO DE
LAVOURAS**

ANDRE LUIS FREITAS

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni

UBERLÂNDIA - MG

2026

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DE MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ANDRE LUIS FREITAS APRESENTADA
À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 19/03/2026.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
FEQUI/UFU - Orientador

Profa. Dra. Patrícia Angélica Vieira
FEQUI/UFU

MSc. Warlen Agnelo Dias
PPGEQ/UFU

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Keila e Rubiano, minhas inspirações, por todo amor em momentos de dificuldade e alegria, pela proteção e conselhos.

A minha irmã, Karine, que com sua bondade acreditou em mim até quando eu mesmo não acreditei.

A quatro grandes irmãos, Guilherme, Adão, Robão e Wagno, pela convivência de mais de uma década, com muitos conselhos e companheirismo.

A minha madrinha, Fabiola, por todo apoio e confiança em mim, e meus avós, Rozilda, Paulo, Valter e Amélia.

Agradeço a dois bons amigos, Iuri Veiga e Arthur Parreira, pelas risadas e amizade que toda graduação poderia proporcionar.

A todos que me ajudaram a realizar esse sonho.

“ Mesmo quando eu andar por um vale de trevas e morte, não temerei perigo algum, pois tu
estás comigo; a tua vara e o teu cajado me protegem.”

Salmos 23:4

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
LISTA DE ABREVIACÕES	iii
RESUMO	v
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral	2
1.2 Objetivos Específicos	3
2 METODOLOGIA.....	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Fertilizantes Fluidos	5
3.2 Fertirrigação.....	5
3.2.1 Tipos	5
3.2.2 Otimizações	10
3.3 Operações anteriores à fertirrigação	10
3.3.1 Fertirrigação a partir do uso de efluentes	10
3.3.2. Operações	11
4. Estudo de Caso: Análise comparativa da aplicação de diferentes efluentes por meio da fertirrigação.	18
4.1 Análise da produtividade do milho utilizando diferentes soluções nutricionais	18
4.2 Avaliação do desempenho da filtragem aplicados na irrigação via gotejamento.....	20
4.3 Comparação da produtividade entre cinco formas de tratamento para suplementação do solo.	23

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	27
5.1. Conclusão	27
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pivô central utilizado para irrigação por aspersão, muito utilizado no Brasil.....	7
Figura 2 – Utilização de microaspersores para suplementação do solo.....	8
Figura 3 – Uso de microirrigação via gotejamento.....	9
Figura 4 – Implementação de irrigação por superfície em lavouras.....	9
Figura 5 – Visualização interna de um filtro utilizado em lavouras.....	13
Figura 6 – Processo de sedimentação em tanques e biodigestor.....	15
Figura 7 – Impelidor para garantia de homogeneização.....	17
Figura 8 – Espigas de milho dos tratamentos NPK, EfPk, Ef, PK da esquerda para direita	20
Figura 9 – Representação dos filtros utilizados no experimento.....	21
Figura 10 – Representação dos sistemas de pós-tratamentos.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Compatibilidade para produção de fertilizantes fluidos.....	6
Tabela 2 – Cargas nutricionais de cada forma de tratamento.....	19
Tabela 3 – Resultados e índices físicos de qualidade dos frutos.....	19
Tabela 4 – Especificações dos filtros.....	22
Tabela 5 – Propriedades físico-biológicas do efluente.....	22
Tabela 6 – Características de saída de cada filtro.....	23
Tabela 7 – Caracterização de cada um dos pós-tratamentos.....	24
Tabela 8 – Características físico-químicas do esgoto e efluentes.....	25
Tabela 9 – Avaliação da produtividade da lavoura de quiabo.....	25

LISTA DE ABREVIACÕES

ANOVA – Análise de Variância

AO – Adubo Orgânico

AS – Sulfato de amônio

C – Calcários

CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos da Paraíba

CP – Cloreto de potássio

CV – Cal virgem, hidratada e recalcinada

DAP – Fosfato de diamônio

DBO– Demanda biológica de oxigênio

DMS – Diferença Mínima Significativa

DQO – Demanda química de oxigênio

E – Escórias

FN – Fosfatos naturais

FO – Farinha de ossos

HA– Hectare

IA – Inteligência Artificial

LEPA – Aplicação de Precisão de Baixa Energia

MAP – Fosfato de monoamônio

N – Nitrocálcio

NA – Nitrato de amônio

NP – Nitrato de potássio

NS –Nitrato de sódio

NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl

OD – Oxigênio Dissolvido

OMS – Organização Mundial da Saúde

PH – Potencial hidrogeniônico

SP – Sulfato de potássio

SPM – Sulfato de potássio e magnésio

SS – Superfosfato simples

SST – Sólidos Solúveis Totais

ST – Superfosfato triplo

T – Tonelada

TF – Termofosfatos

U – Ureia

UASB – Reator anaeróbico de fluxo ascendente

URAN – Solução de Nitrato de Amônio e Ureia

RESUMO

Com a evolução da fertilização, iniciada há milênios com compostos orgânicos como fonte de nitrogênio, potássio e fósforo, esterco, por exemplo, foram criadas novas tecnologias até chegar no que hoje é chamado de fertirrigação, e com esse desenvolvimento surgiram novas técnicas de aplicação de fertilizantes, principalmente por via líquida. Dessa forma, as principais técnicas utilizadas na fertirrigação é aspersão, irrigação por superfície e microirrigação, englobando gotejamento tradicional ou subterrâneo. A utilização de efluentes tratados na fertirrigação apresenta-se como uma alternativa estratégica para a gestão de recursos hídricos e a recuperação de nutrientes pelo direcionamento do efluente sanitário, que quando mal descartado pode vir a gerar impasses socioeconômicos e ambientais. Empregando efluentes sanitários, alimentícios ou oriundo do manejo animal no uso como fonte de nutrientes vitais ao solo, se torna necessário um tratamento prévio visando maior segurança alimentar. Muitos desses materiais podem ser altamente nocivos aos vegetais e, conseqüentemente, ao ser humano numa escala posterior de consumo, surgindo as operações unitárias, como decantação, sedimentação e agitação, que atuam como pilares para estabilização e padronização da solução nutritiva. O presente trabalho buscou validar o uso de efluentes na fertirrigação, principalmente sanitário, rico em carga nitrogenada, avaliando também a filtração como o fator limitante para a integridade física e viabilidade do sistema, em que filtros de disco apresentaram desempenho superior em relação aos filtros de tela automáticos, que sofreram queda de eficiência para -5% devido ao arraste da torta orgânica durante a retrolavagem. Em termos de produtividade, a análise dos sistemas de pós-tratamento de efluentes brutos revelou que o leito de brita e o reator UASB alcançaram rendimentos de 24,72 e 25,75 t/ha, respectivamente, mostrando-se estatisticamente equivalentes à adubação mineral, com produtividade de 27,85 t/ha, a cultura do quiabo. Contudo, a segurança sanitária mostrou-se como variável crítica de controle, uma vez que apenas o leito de brita e a lagoa de polimento garantiram a remoção total de ovos de helmintos, parâmetro essencial para a conformidade com as normas da OMS, mas apresentaram necessidade de uma etapa complementar para remoção e adequação às normas sanitárias quanto à quantidade de coliformes termotolerantes presentes na solução de irrigação.

Palavras-chave: Filtração, fertilizantes fluidos, produtividade, gotejamento.

1 INTRODUÇÃO

A origem de técnicas de liberação de água às plantações de formas controladas é datada, com certa incerteza, da antiguidade, no Egito e Mesopotâmia, por volta de 6000 a.C, onde os textos mais seguros, relativos a técnicas de irrigação, remetem ao Médio Império Egípcio, datado de 2000 a.C. Nesse contexto de criação e primeiros usos da técnica, o desenvolvimento e coordenação da irrigação pode ter sido um dos fatores principais que culminou na formação de um Estado unificado, com necessidade de previsão de cheias dos rios e controle estratégico das águas e rios (Yoyotte *et al.*, 2010).

Frizzone (2017) afirma que existem quatro formas de irrigação: por aspersão, microirrigação ou irrigação localizada e irrigação via gotejamento, podendo ser superficial ou subterrânea. A irrigação por aspersão se desenvolveu após a Segunda Guerra Mundial, promovida pela produção de metais leves que culminaram na criação de aspersores de diferentes tamanhos e capacidades. No Brasil o principal uso é o aspersor convencional rotativo portátil, com crescimento e estabelecimento de sistemas mecanizados utilizando pivô central com alto nível de automação.

Segundo Keller e Karmeli (1975), o sistema de gotejamento é datado na Inglaterra em 1940, utilizada em estufas de vidro, com algumas referências indicando também presença dessa técnica no Afeganistão desde meados do século XIX. Fertirrigação, a partir do estudo de Silva e Soares (2009), é a aplicação de fertilizantes via águas residuais ou de irrigação, utilizando fertilizantes líquidos ou sólidos solúveis, caracterizada pela economia em mão de obra e custo de fertilizante, atua com alta eficiência, além da possível ocorrência negativa de fertilizantes sólidos de baixa qualidade e aumento da condutividade elétrica da água, utilizada como veículo, podendo gerar salinização do solo.

Especificamente, o gotejamento consiste em aplicação do formato de gotas, na superfície ou subterrâneo do solo, enquanto a técnica por aspersão utiliza o aspersor fixado no solo ou sustentado, que libera o fertilizante de forma gradual. Em termos de economia visando alta eficiência, a técnica de gotejamento se torna melhor frente a aspersão visto que o arraste de material disperso no ar pode representar até 10% da totalidade aplicada. Esse problema é contornado com sistemas automatizados que interrompem a fertilização em alta velocidade dos ventos (Frizzone *et al.*, 2012).

Dentre os principais nutrientes aplicados nas plantas, o nitrogênio é aquele com maior aplicação, frente ao potássio e fósforo, em razão de sua alta mobilidade no solo, alto índice

salino e baixa necessidade da maioria das culturas. A fonte mais utilizada é a ureia pelo seu baixo custo e baixo índice salino em relação a concentração do nutriente. (Borges; Silva, 2011). Segundo Frizzzone *et al.* (2012), além da necessidade dos nutrientes, também deve ser avaliado a solubilidade e compatibilidade com aquele solo específico e suas carências, poder salino, corrosivo e toxicidade.

A utilização de efluentes na agricultura se torna um procedimento ideal devido a toda carga gerada pela atividade humana. Segundo Silva (2022), cada habitante gera por dia 105,33 litros por dia de efluente sanitário, definida como água cinza e caracterizada pelo uso humano, porém isentas de dejetos humanos. A geração de um grande volume de material que pode vir a ser nutritivo possibilita o reuso contínuo dos nutrientes em lavouras, de forma a beneficiar e propagar o ciclo de reuso e reaproveitamento de componentes suplementares ao vegetal e solo.

Essa alta carga carrega consigo vestígios do metabolismo humano e se torna tóxico ao vegetal se aplicado de forma direta, sem pré-tratamentos. Segundo Who (2006), é necessário que, para a irrigação ser segura ao solo, exista menos de 200 unidades de coliformes a cada 100 mL de água utilizada em vegetações que seres humanos estarão em contato físico, sendo flexibilizado para até 10^5 colônias de bactérias para cada 100 mL de água, em caso de irrigação para alimentos normalmente cozidos ou refogados e 10^3 a cada 100 mL em vegetais que podem ser comidos crus.

Para a análise de outro componente de risco, segundo a ISO 16075-2:2020, ovos de helmintos devem ser limitados a 1 ovo a cada litro de água levada a irrigação, e de forma mais rigorosa 0,1 ovo/L se tratando de grupos de risco, como crianças por exemplo que são alvos fáceis de infecções propagadas por esses grupos.

Em um contexto de evolução e aumento do número populacional, surge a necessidade de implementar e otimizar toda cadeia produtiva para atender toda população e a utilização de componentes gerados pela atividade humana se tornam cada vez mais úteis por atuarem com dois objetivos benéficos ao ser humano. A utilização de efluentes tratados na fertirrigação surge como uma forma de aproximar cada vez mais a evolução da necessidade humana de alimento, otimização de processos agrícolas e segurança alimentar.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa monografia é avaliar a viabilidade do uso de efluentes tratados na prática de fertirrigação, junção das práticas de irrigação e fertilização, e comparar com formas semelhantes de aplicação já consolidadas no meio agrícola.

1.2 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos podem ser citados:

- Demonstrar como efluentes de diferentes características físico-químicas podem ser reaproveitados como fertilizantes.
- Sugerir técnicas de tratamento prévio ao gotejamento, evitando o entupimento de irrigadores.
- Verificar a eficiência de remoção de patógenos e contaminantes em diferentes sistemas de pós-tratamento.
- Abrir possibilidades para estudos futuros relacionados a fertirrigação utilizando efluentes pré-tratados ricos em potássio e fósforo.

No segundo capítulo deste trabalho será apresentado a metodologia para levantamento e escolha de todo material de apoio e fundamento teórico. Essa parte inicial é vital para toda estrutura e aquilo que virá a tornar-se o trabalho propriamente dito. Especificando todo processo de seleção e detalhando-o, foi possível obter referências pertinentes e garantir o rigor técnico exigido para realização de uma monografia.

Já o Capítulo 3 visa introduzir conceitos, a partir de uma revisão bibliográfica, para possibilitar a compreensão de variáveis de processo que influenciam na atividade agrícola de fertirrigação reutilizando efluentes tratados, iniciando por fertilizantes líquidos até o detalhamento e caracterização das principais técnicas de fertirrigação adotadas e finalizando com os processos e fenômenos que regem toda preparação da solução nutritiva para aplicação na lavoura.

O Capítulo 4 se constitui em um estudo de caso explorando três trabalhos da literatura realizados em campo, com objetivo de elucidar e criar um elo entre a teoria e prática, possibilitando a validação de processos de pré-tratamento. Esses estudos de caso foram selecionados rigorosamente com o intuito de expor como diferentes efluentes sanitários podem ser utilizados de forma segura e com alta eficiência e produtividade.

Por fim, o Capítulo 5 finaliza este trabalho com uma conclusão e sugestões para trabalhos posteriores, com finalidade de apurar possíveis lacunas observadas durante a realização dessa pesquisa, e apresentar todos resultados percebidos durante realização das análises do Capítulo 4 apoiado pela teoria do Capítulo 3.

2 METODOLOGIA

A fundamentação teórica deste trabalho foi estruturada a partir de uma pesquisa sistemática e rigorosa pautada na seleção de material relevante ao tema do estudo. A estratégia de busca se concentrou na utilização de palavras-chaves centrais como fertirrigação, efluentes e pré-tratamentos, em português e inglês, nos últimos 5 anos quando possível. Essa combinação possibilitou a filtragem de estudos direcionados a utilização de efluentes pré-tratados na fertirrigação de lavouras.

Dentre os bancos de dados consultados para realizar a seleção, respeitando os critérios pré-definidos, aquelas com maior destaque foram o Google Acadêmico, Portal de Periódicos da CAPES e biblioteca eletrônica SciELO. A partir desse método, foram observados 60 trabalhos que encaixavam nesses termos e com potencial de utilidade e viabilidade para aproveitamento neste trabalho.

Com uma leitura integral de cada um desses estudos, 20 trabalhos se mostraram ideais para o desenvolvimento e apoio teórico. Foram desconsiderados aqueles que suprimiam algum dado relevante ao tema, por excessiva simplificação, ausência de avaliação de critérios sanitários ou que impossibilitasse a análise do ponto de vista de engenharia. Dessa forma, foi possível obter com êxito o conjunto de trabalhos relevantes para realização de um estudo robusto relacionado a fertirrigação, segurança alimentar e sanitária e efluentes sanitários.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fertilizantes Fluidos

Fertilizantes fluidos correspondem a uma solução nutricional rica em nutrientes para o solo com potencial de facilitar o desenvolvimento vegetal. Aqueles mais comuns são os nitrogenados, um exemplo é a mistura de nitrato de amônio e ureia, formando o URAN, caracterizada como uma solução verdadeira estável com pouca perda por volatilização, esse aspecto permite que micronutrientes sejam adicionados em soluções verdadeiras sem risco de perda de estabilidade (Borges; Silva, 2011).

Soluções em suspensão também podem ser utilizadas na fertirrigação, mas em aspersores e não em gotejadores por risco de entupimento. Outro fator importante que deve ser considerado é a compatibilidade dos fertilizantes ao se realizar misturas líquidas para não haver formação de precipitado sólido (Borges; Silva, 2011). A Tabela 1 mostra a compatibilidade entre alguns fertilizantes.

3.2 Fertirrigação

Fertirrigação é a aplicação de fertilizantes via águas residuais ou de irrigação ricas em nutrientes necessárias pelo solo. Podem ser utilizados fertilizantes líquidos ou sólidos solúveis, geralmente são utilizadas técnicas de precisão, como gotejamento e microaspersão, ou aliadas ao declive do terreno, como por superfície (Silva; Soares, 2009).

3.2.1 Tipos

Existem três formas de irrigação: por aspersão, microirrigação ou irrigação localizada, onde podem ser por microaspersores ou via gotejamento, de forma tradicional ou subterrânea, e irrigação por superfície. Cada uma dessas técnicas possui sua particularidade e não existe uma única que vai atender todos os objetivos de diversas culturas, solos, climas, culturas e interesses socioeconômicos, necessitando um estudo detalhado e avaliação para cada projeto (Frizzone, 2017).

Tabela 1 – Compatibilidade para produção de fertilizantes fluidos.

Fertilizante	AO	NS	NP	N	NA	SA	U	FO	FN	SS	ST	MAP	DAP	E	TF	CP	SP	SPM	CV	C
Aubos Orgânicos																				
Nitrato de sódio	C																			
Nitrato de Potássio	C	C																		
Nitrocálcio	C	C	C																	
Nitrato de Amônio	C	C	C	C																
Sulfato de Amônio	C	C	C	C	C															
Ureia	C	C	C	I	I	C														
Farinha de Ossos	C	C	C	C	C	C	C													
Fosfatos Naturais	C	C	C	C	C	C	C	C												
Superfosfato Simples	C	C	C	C	C	C	CI	C	C											
Superfosfato Triplo	C	C	C	C	C	C	CI	C	C	C										
MAP	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C									
DAP	C	C	C	C	C	C	C	C	C	CI	CI	C								
Escórias	I	C	CI	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I							
Termofosfato	I	C	CI	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C						
Cloreto de Potássio	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	CI	CI	CI				
Sulfato de Potássio	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	CI	CI	CI	C			
Sulfato de Potássio e Magnésio	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	I	I	C	C		
Cal Virgem, hidratada e calcinada	I	C	CI	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	C	CI	CI	I	
Calcários	I	C	CI	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	C	C	CI	CI	C	C

Nota: C para Compatível, CI para Compatibilidade Intermediária e I para incompatível.

Fonte: Adaptado de Borges e Silva (2011).

- **Irrigação por aspersão**

É caracterizada pelo uso de tubos para condução do fluido fertilizante e aspersores, uma espécie de borrifador, de diferentes tamanhos, com função de dispersão no ar. Pode ser do tipo convencional, apoiado no chão, ou mecanizado, que utiliza torres de sustentação para fazer a dispersão na direção do solo e diminuir a quantidade arrastada pelos ventos. Esse tipo de irrigação é utilizado em solos com declives acentuados, como encostas, terraços e platôs elevados (Frizzzone, 2017).

Algumas limitações para essas técnicas são observadas, como por exemplo o alto custo de instalação e operação, irrigação irregular devido a ação dos ventos e selamento dos solos pelo excesso do cátion Na^+ , água com concentração de cloreto de sódio acima de 0,3% não são indicadas para aspersão (Frizzzone, 2017). A Figura 1 apresenta um importante equipamento presente em diversas lavouras no Brasil, útil pela sua versatilidade e facilidade de implementação e uso, enquanto a Figura 2 se trata do aspersor mais utilizado em pequenos jardins e irrigação de menores proporções.

Figura 1 – Pivô central para irrigação por aspersão.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026) com auxílio de Inteligência Artificial.

Figura 2 – Utilização de microaspersores para suplementação do solo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026) com auxílio de Inteligência Artificial.

- **Microirrigação ou irrigação localizada**

Essa técnica compreende a aplicação de água em baixo volume e alta frequência, de forma que o solo sempre fique com alta umidade. Essa forma de irrigar o solo é a que melhor favorece a fertirrigação por conceder doses frequentes de água e suplementação de nutrientes, sendo útil em regiões onde água é escassa e com alto valor, com topografia irregular e solo arenoso. A microirrigação desperta muito interesse pela economia de água e energia intrínseca ao seu modelo de irrigação, com possibilidade de ter um processo completamente automatizado e mão de obra reduzida (Frizzzone, 2017).

Dentro dessa classe pode citar duas técnicas, a primeira é gotejamento, semelhante ao pivô central, também possui direção voltada ao solo, porém atua com baixo volume e a uma distância pequena da vegetação ou até mesmo subterrânea, em contato com o solo (Frizzzone, 2017). A Figura 3 ilustra esse processo de precisão aplicado em campo.

- **Irrigação por superfície**

Também conhecida como irrigação por gravidade, consiste em disposição de água na área irrigada do solo, sem causar erosão, permitindo o escoamento a partir da gravidade. Para esse processo ocorrer, deve haver um declive no solo que permite a água fluir entre os sulcos e, a infiltração, juntamente a rugosidade da superfície, permitem toda área cultivável ser irrigada. Essa técnica pode ser realizada com uma quantia pequena de água, utilizando sulcos e faixas

ou inundação completa, utilizando alto volume de água por longos períodos, o arroz é um exemplo de inundação prolongada, não podendo ser generalizado para todas as culturas pela sensibilidade à saturação do solo na zona radicular, que pode vir a formar uma crosta dura. Esse sistema consegue atuar com alta eficiência e pouco consumo energético em todas as formas de utilização e tem a possibilidade de ser altamente automatizado, como representado na Figura 4 de forma convencional (Frizzzone, 2017).

Figura 3 – Uso de microirrigação via gotejamento.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026) com auxílio de Inteligência Artificial.

Figura 4 – Implementação de irrigação por superfície em lavouras.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026) com auxílio de Inteligência Artificial.

3.2.2 Otimizações

O investimento para o máximo de automatização é uma forma de melhorar o processo e buscar padronização e previsão de todas as variáveis que influenciam na atividade de fertilização, como por exemplo o uso de emissores tipo LEPA (Aplicação de Precisão com Baixo Consumo Energético), um modelo de aspersor de alta tecnologia que proporciona alta eficiência, precisão e baixo consumo energético. Os dutos que promovem o fluxo de fluido dificultam a colheita e devem ser retirados anteriormente, esse processo pode ser automatizado e exige um sistema de retirada ou aterramento desses tubos tanto para não os danificar quanto para facilitar a colheita.

Além disso, esses tubos também exigem monitoramento constante para evitar entupimento, essa melhoria faz com que as vidas úteis dos materiais aumentem, afetando também o setor de manutenção e toda escala produtiva e econômica da atividade agrícola. A automatização não é focada apenas em melhoria de equipamentos, mas também na reutilização dos componentes utilizados, como investimento em reuso de efluentes agrícolas e promoção do ciclo da água naqueles campos que não fazem ou fazem de forma precária (Frizzone, 2017).

Outra forma de otimização, melhoria e preservação dos equipamentos, solo e natureza, é a preparação da solução nutricional de forma eficiente antes de utilizar o bombeamento para passagem nos dutos de irrigação. Essa preparação acontece a partir de processos de separação de sólidos tóxicos ou prejudiciais para a saúde da cultura, como por exemplo filtração, precipitação, sedimentação e decantação, e agitação.

3.3 Operações anteriores à fertirrigação

As operações unitárias, muito utilizadas durante o estudo de separações físicas, possuem grande importância nessa etapa. Preparar a solução fertilizante para passagem nos dutos de irrigação é vital, tanto para saúde do solo quanto para integridade e preservação dos equipamentos. Essas operações podem ser realizadas de forma rudimentar, com equipamentos acessíveis e rudimentares, objetivando menor custo para agricultores familiares, ou equipamentos de alta sofisticação, com foco na automação, precisão e alta eficiência.

3.3.1 Fertirrigação a partir do uso de efluentes

Águas residuais são compostas por água e esgoto urbano após utilização pela sociedade em uma gama de aplicações. Efluentes e águas residuais são consideradas sinônimos, porém o último termo é mais amplo e refere-se a qualquer mudança feita na água pela atividade humana,

seja ela doméstico, industrial ou agrícola, enquanto efluente é o fluxo de saída de um sistema ou processo. A água residual pode apresentar em sua composição microrganismos patogênicos oriundos do trato intestinal humano, mutagênicos e carcinogênicos, porém, também apresentam nutrientes vitais para suplementação do solo e plantas (Metcalf & Eddy, 2014).

Batista *et al.* (2008) ressaltaram o crescente uso de efluentes de esgoto tratados na fertirrigação e a necessidade de tratamento criterioso de águas residuárias para aplicação no solo. Em seu estudo, o maior desafio das unidades de tratamento de efluentes se relacionava com o entupimento nas unidades de filtração, causado principalmente pela presença de zooplâncton, fitoplâncton e larvas de insetos. Segundo os autores, a irrigação localizada é o método mais indicado para o uso de águas residuárias por sua alta eficiência e baixo risco sanitário, porém sua alta suscetibilidade ao entupimento exige sistemas de filtração robustos.

Já para Silva (2009), o ferro é um dos principais problemas da água de irrigação devido sua possibilidade de oxidar para Fe^{3+} ao atravessar sistemas de filtragem, resultando em um íon mais oxidado e menor solubilidade em água, juntamente ao manganês, que também compartilha essa característica em mudar seu estado de oxidação com facilidade e prejudicar sua diluição.

O uso de efluentes domésticos ou industriais e não água tratada, até mesmo potável, se justifica pelo metabolismo vegetal, onde a água potável seria considerada água nobre e a maioria das culturas conseguem prosperar com alta eficiência sendo irrigada por água de qualidade inferior, além de que muitos efluentes industriais ou até mesmo domésticos já possuem nutrientes necessários as vegetações, diminuindo a compra de fertilizantes para preparar a solução de suplementação.

A seguir estão descritas as principais formas de preparação da solução utilizada em fertirrigação, onde muitas vezes são utilizadas de forma conjunta.

3.3.2. Operações

- **Filtração**

Filtração é a remoção de partículas sólidas através de um meio filtrante pela passagem de algum fluido. Esse fluido pode ser líquido ou gás, ou até uma mistura de ambos, e ele flui através do diferencial de pressão do meio. Existem três grandes grupos que classificam os filtros: filtros de torta, filtros de clarificação e filtros de fluxo cruzado (McCabe, 1967). A Figura 5 apresenta uma possibilidade de filtro que pode ser útil em lavouras.

Para o estudo no campo de fertirrigação, a classificação que melhor encaixa naquilo objetivado com a preparação da solução nutritiva seria os filtros de clarificação atuando com a

força gravitacional. Segundo McCabe (1967), o meio filtrante de um filtro gravitacional não pode ser excessivamente fino e é ideal para remoção de pequenas quantidades de sólidos.

Como demonstrado no estudo de Batista *et al.* (2008), a escolha do elemento filtrante impacta diretamente a qualidade da água destinada para fertirrigação. Em seus experimentos com esgoto sanitário, observou-se que filtros de malha, 550 mesh e de discos, 120 mesh, apresentaram capacidades médias de remoção de sólidos suspensos de 30,64% e 28,34%, respectivamente. Esses valores reforçam que, embora a filtração seja essencial para proteger o sistema de gotejamento, uma parte considerável dos sólidos ainda permanece no fluido, exigindo monitoramento constante da perda de carga para o entupimento dos dutos de irrigação, principal problema presente na técnica de gotejamento. A pesquisa mostra que o acúmulo de matéria orgânica ao longo da linha gera uma perda de carga que pode ultrapassar o limite aceitável de 20 kPa, tornando o monitoramento dos dutos e a limpeza dos filtros indispensável para a continuidade da fertirrigação.

Pitoro *et al.* (2022) também observaram que a fertirrigação por gotejamento é um método de alta confiabilidade embora sua fragilidade seja a suscetibilidade dos gotejadores à obstrução. Os autores salientam que o tratamento prévio e uma gestão rigorosa dos efluentes são fatores determinantes para minimizar o prejuízo das características operacionais do sistema e garantir a viabilidade agrícola. Para os pesquisadores, esse entupimento é causado por precipitados de sais, microrganismos e partículas sólidas, além da presença de ferro e bactérias, sendo os filtros de areia o sistema mais utilizado para retenção da matéria orgânica e inorgânica.

Sua pesquisa expôs que o pré-tratamento anterior a fertirrigação, utilizando efluente de esgoto doméstico como fonte de nutrientes, em filtros anaeróbicos completamente preenchidos com brita apresenta excelente desempenho hidráulico, com coeficientes de uniformidade de distribuição, índice estatístico que mede o quão igualitário foi a aplicação de água e nutrientes por emissores após a irrigação, superiores a 90% e considerável redução de parâmetros críticos, como sólidos suspensos totais (SST) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e baixo risco de obstrução Pitoro *et al.* (2022).

De acordo com a pesquisa de Paterniani *et al.* (2011), pode ser observado que a filtração lenta se apresenta como uma tecnologia de polimento de baixo custo e simples operação, sendo ideal para viabilizar o aproveitamento de efluentes domésticos na agricultura. Os autores destacam que este método é eficiente na remoção de impurezas físicas, químicas e biológicas, ajudando a minimizar os impactos ambientais sobre os recursos hídricos ao transformar o efluente em água de reuso para fertirrigação com baixo risco de entupimento da linha de irrigação.

Conforme mostrado em seu estudo, realizado com intuito de comparação entre duas unidades de filtração, onde dois barris foram preenchidos com areia e somente um deles adicionado uma camada de carvão ativado, pode ser observado que a adição dessa camada de material adsorvente no meio filtrante amplia a eficiência do sistema de polimento em relação a todos parâmetros avaliados, oxigênio dissolvido (OD), concentração do íon ferro e manganês, sólidos suspensos, cor, turbidez e DQO. Esta configuração permitiu alcançar eficiências de remoção de até 39,3% para turbidez, 44,01% para cor aparente e 72,6% para *E. coli* (bactéria para indicação de contaminação fecal), demonstrando ser superior ao uso exclusivo de areia sem aumento da perda de carga no filtro Paterniani *et al.* (2011).

Figura 5 – Visualização interna de um filtro utilizado em lavouras.



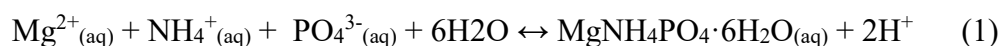
Fonte: Elaborada pelo autor (2026) com auxílio de Inteligência Artificial.

- **Precipitação**

Tanto a precipitação quanto a dissolução são duas operações importantes na estabilidade de soluções nutritivas e suplementação. Esses processos são regidos pela taxa de reação e equilíbrio químico do sistema e ditam os limites teóricos de solubilidade, saturação, grau de

cristalinidade e possíveis reações adicionais, paralelas ou em série. Esses sistemas podem ser divididos em homogêneos, ácido-base por exemplo, e heterogêneos, caracterizados por alcançar lentamente o equilíbrio e instabilidade de fases (Snoeyink; Jenkins, 1991).

Foi observado por De Teves Inácio *et al.* (2022) que a recuperação de nutrientes com alto teor de nitrogênio e potássio a partir de efluentes agroindustriais, como o lixiviado de compostagem, vinhaça sucroalcooleira, bovinocultura e suinocultura, representa uma estratégia promissora para o fechamento do ciclo de nutrientes e a promoção da sustentabilidade dentro do ecossistema agrário. Em sua análise, foi realizado a precipitação química de estruvita, $\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, utilizando o lixiviado de compostagem de uma agroindústria de processamento de hortaliças misturadas a resíduos de esterco e urina de cavalo. Nessa amostra, foi encontrada íons importantes para o solo que podem ser utilizados em fertirrigação, como NH_4^+ , PO_4^{3-} , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , e pH de 8,2, ideal para a precipitação desse composto. A precipitação foi realizada em laboratório, utilizando de ácido fosfórico e cloreto de magnésio, fontes de fosfato e magnésio, respectivamente, para promover a reação de decomposição da estruvita e liberação de nutrientes importantes para o solo. A seguir, está indicada a reação em questão:



Essa técnica foi importante devido ao aproveitamento do lixiviado que, quando disposto no solo sem pré-tratamento, prejudicam a fertilização das plantas e todo processo de suplementação do solo pela presença dos íons Na^+ e Cl^- , desencadeando salinização do solo. O ponto chave de todo esse processo é separar os nutrientes essenciais, feitos pela reação, daquilo que é tóxico e prejudicial ao solo. Ao fim desse processo, haverá um mineral sólido rico em nutrientes benéficos as plantas, que poderá retornar para utilização na irrigação, agora evitando prejuízo ao solo, e um líquido contendo os íons prejudiciais aptos para descarte ou reaproveitamento.

- **Sedimentação e Decantação**

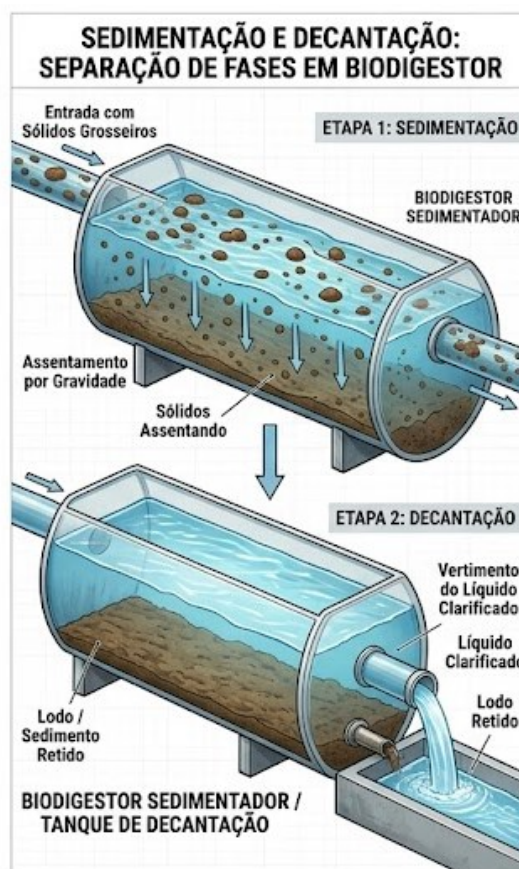
A sedimentação pode ser compreendida como um fenômeno de separação de partículas suspensas baseado na diferença de densidade entre o sólido e o líquido, por forma natural via decantação gravitacional ou induzida, de forma a acelerar a deposição de sólido no fundo. Esses processos no campo da fertirrigação são utilizados principalmente para remoção de areia, brita e outros sólidos suspensos. Esse fenômeno pode acontecer em bacias de sedimentação aliado

ao processo de floculação e coagulação química (Metcalf & Eddy, 2014). A Figura 6 apresenta como esse processo ocorre no interior de um tanque.

O trabalho desenvolvido por Vaz (2022) avaliou a viabilidade energética, técnica e econômica de sistemas integrados de biodigestores e biofertilizantes, aplicados via fertirrigação, em Toledo, Paraná. O objetivo de sua avaliação foi apresentar que o sistema montado em uma grana de suínos foi energeticamente autossuficiente e rentável pela comercialização de eletricidade e biofertilizante líquido.

Nesse trabalho foi evidenciado a ação da sedimentação atuando de forma semelhante a um tratamento preliminar, anterior a inserção de dejetos fresco no biodigestor, com objetivo de remoção de material sólido denso da amostra, utilizando caixas de sedimentação. Esse processo foi responsável pela barragem de materiais prejudiciais a digestão, principalmente areia e pedras, possibilitando a preservação da tubulação que antes poderia desgastar ou entupir pela presença de materiais pesados e viabilizando toda realização da experiência (Vaz, 2022).

Figura 6 – Processo de sedimentação em tanques e biodigestor.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026) com auxílio de Inteligência Artificial.

- **Agitação e Mistura**

As operações unitárias de mistura e agitação são comumente consideradas semelhantes, mas são dois processos distintos. Agitação se refere a um movimento específico induzido a um fluido, com objetivo de suspender partículas sólidas, misturar líquidos miscíveis, dispersão de fluidos ou troca de calor entre líquidos e uma camisa ou serpentina, enquanto mistura é a disposição de fases diferentes, inicialmente separadas, uma na outra (McCabe, 1967). A Figura 7 apresenta um sistema de agitação e mistura que pode ser utilizado em lavouras.

Os equipamentos projetados para agitar e, conseqüentemente, misturar, são chamados de impelidores e podem ser do tipo pás, hélices e turbinas, sendo o último aquele mais conhecido e utilizado pela alta eficiência de mistura e agitação para uma ampla faixa de viscosidade (McCabe, 1967).

Como observado por Gava *et al.* (2010), a eficiência dos sistemas de fertirrigação depende diretamente da capacidade de promover uma mistura homogênea entre o produto líquido e fertilizantes sólidos. Em seu estudo sobre a aplicação de vinhaça e ureia na cultura da cana-de-açúcar, foi demonstrado que a utilização de um tanque de pré-mistura para a dissolução do nitrogênio na linha de fertirrigação permite uma aplicação precisa que não altera prejudicialmente o solo nem o rendimento da cultura.

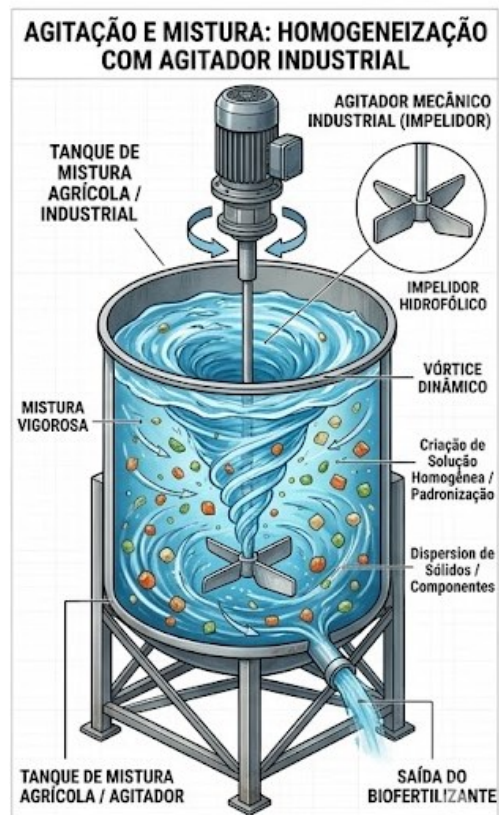
Esse estudo foi fundamental, pois mostra que o método convencional de adubação por cobertura em sulcos, o qual exige um uso intensivo de máquinas e mão de obra, pode ser substituído por sistemas simples de fertirrigação, reduzindo o tráfego de maquinário nas áreas de cultivo e, conseqüentemente, diminuindo impactos ambientais e custos de produção Gava *et al.* (2010).

Em sua pesquisa, Gava *et al.* (2010) trabalharam em triplicata de sistemas convencionais e sistemas diluídos, de 150, 300 e 450 m³ por hectare contendo a solução de suplementação. O sólido nutritivo foi disposto em sulcos de 0.15 metros de profundidade, caracterizando o método convencional, enquanto para o método usando solução foi via sistema de irrigação por aspersão, sendo a única variável nesse processo o volume de vinhaça aplicado.

A análise do rendimento e densidade do solo indica que a preparação de solução via diluição da mistura de vinhaça e ureia atuam de formas semelhantes, não sendo percebido diferença entre as aplicações, contudo, a irrigação apresenta características de automação e otimização que o método convencional não dispõe, tornando o processo com maior eficiência e custos menores por ser uma característica intrínseca ao processo de irrigação, o fato de permitir grandes otimizações sem necessariamente aumentar a produtividade do processo, mas atingindo outras variáveis que para o produtor se torna extremamente vantajoso Gava *et al.*

(2010).

Figura 7 – Impelidor para garantia de homogeneização.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026) com auxílio de Inteligência Artificial.

4. Estudo de Caso: Análise comparativa da aplicação de diferentes efluentes por meio da fertirrigação.

Nesta seção foi apresentado o estudo de caso com o intuito de validar conceitos e técnicas descritas anteriormente, unindo de forma comprovada e realista operações unitárias com tratamento de efluentes e fertirrigação. Para ilustrar a complexidade e particularidades técnicas, além da viabilidade de utilização de efluentes tratados como suplementação agrícola, foram selecionadas três situações distintas que abordaram esses temas, cada qual com suas particularidades.

Essa análise também buscou mostrar que os efluentes devem ser vistos como uma alternativa hídrica e nutritiva, conforme apresentado anteriormente, mas além disso, deve ser observado que as especificações dos processos devem ser controladas de forma rigorosa e dispostos de forma segura. Dessa forma, o foco da discussão foi observar e comparar o impacto das condições operacionais na eficiência dos sistemas, servindo como elo entre dimensionamento e desempenho.

4.1 Análise da produtividade do milho utilizando diferentes soluções nutricionais

Abreu *et al.* (2022) realizaram um experimento com intuito de avaliar a fertirrigação do milho utilizando água negra, caracterizada por ser um efluente sanitário. Os sistemas básicos de saneamento utilizados no Brasil podem não atingir o patamar ideal de remoção de bactérias para serem utilizadas no campo, a partir desse impasse, foi criado pela EMBRAPA um sistema de tratamento anaeróbio descentralizado, que utiliza fossas biodigestoras sépticas para tratamento microbiológico a partir da digestão por fermentação.

O estudo foi realizado em São Carlos, no estado de São Paulo, durante 5 meses entre o inverno e o verão, empregando um sistema de irrigação por superfície com sulcos de 0,3 metros de largura e 0,15 metros de profundidade. Para a suplementação do solo, foram utilizados os fertilizantes minerais ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, além do efluente tratado, visando analisar a produtividade do milho e comparar entre quatro combinações diferentes, sendo elas a aplicação de NPK proveniente de fertilizantes minerais, o efluente, atuando como fonte de nitrogênio, juntamente ao PK (EfPK), somente o efluente e somente PK, sem fontes de nitrogênio.

O plantio foi realizado em 4 de outubro e foi fertilizado durante 41 dias após a semeadura, sendo a primeira carga de nutrientes após 7 dias de plantio, com monitoramento do solo para evitar salinização por excesso de nutrientes, após esse período apenas água de

irrigação foi utilizada. A colheita final para avaliação da produtividade da lavoura foi realizada em 4 de fevereiro do ano seguinte. A Tabela 2 apresenta a caracterização de cada forma de nutrição avaliada neste estudo.

Tabela 2 – Cargas nutricionais de cada forma de tratamento.

Tipo	Nutriente	Carga Total Aplicada (kg/ha)
NPK	N	135,0
	P	121,0
	K	133,3
EfPK	N	135,0
	P	121,0
	K	133,3
Ef	N	135,0
	P	2,8
	K	27,1
PK	P	121,0
	K	133,3

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

O objetivo foi aplicar cargas iguais de nutrientes para ser uma avaliação parametricamente justa, porém, por limitação da própria forma de suplementação, alguns íons NPK foram aplicados em quantidades menores ou inexistente. O fato do efluente ser sanitário leva a substituição da fonte de nitrogênio, principalmente pela hidrólise da ureia durante a etapa de tratamento anaeróbio e presença de nitrogênio solúvel no efluente tratado que vai até a zona rural.

A Tabela 3 mostra a produtividade de cada um dos processos utilizados para suplementação da cultura, os parâmetros utilizados foram o peso médio da espiga de milho, o peso médio dos grãos da espiga, a produtividade em kg/ha de grãos e a massa de mil grãos, enquanto que a Figura 8 apresenta a média de espigas de cada tratamento.

Tabela 3 – Resultados e índices físicos de qualidade dos frutos.

Tratamento	Massa da espiga (g)	Massa dos grãos por espiga (g)	Produtividade (kg/ha)	Massa de mil grãos (g)	Índice de Área Foliar
NPK	306,24 a	194,04 a	12127,61 a	401,56 a	3,69 a
EfPK	253,44 ab	156,39 ab	9774,63 ab	376,62 ab	3,58 a
Ef	198,71 b	121,98 b	7623,75 b	344,93 bc	3,07 ab
PK	124,30 c	70,08 c	4379,83 c	339,85 c	2,31 b

Nota: a,b e c são agrupamentos estatísticos e indicam, quando uma parte dos dados possuem a mesma letra, que não há diferença estatística entre eles.

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

Figura 8 – Espigas de milho dos tratamentos NPK, EfPK, Ef e PK, da esquerda para a direita.



Fonte: Abreu *et al.* (2022).

Nesse trabalho foi utilizado o método estatístico ANOVA para análise da variância dos dados e o teste de Tukey ou teste de agrupamento de médias por letras, também chamado de letramento de médias. Para comparação de uma mesma classe de dados entre si, segundo Oliveira (2008) é utilizado a separação de letras de ‘a’ até ‘c’ para hierarquização baseado no desempenho do processo e na confiabilidade estatística, especificamente com base no DMS (Diferença Mínima Significativa), que atua como um limite de significância dos dados, agregando a análise apenas aquilo estatisticamente significativo. Dentro dessa classificação, quando dois dados recebem a mesma letra, é atribuído puramente a ruído ou aleatoriedades do processo, como uma possível diferença do solo, de altitude, de áreas de plantio alimentadas com quantias diferentes durante chuvas ou até mesmo alguma interferência humana ou animal na lavoura.

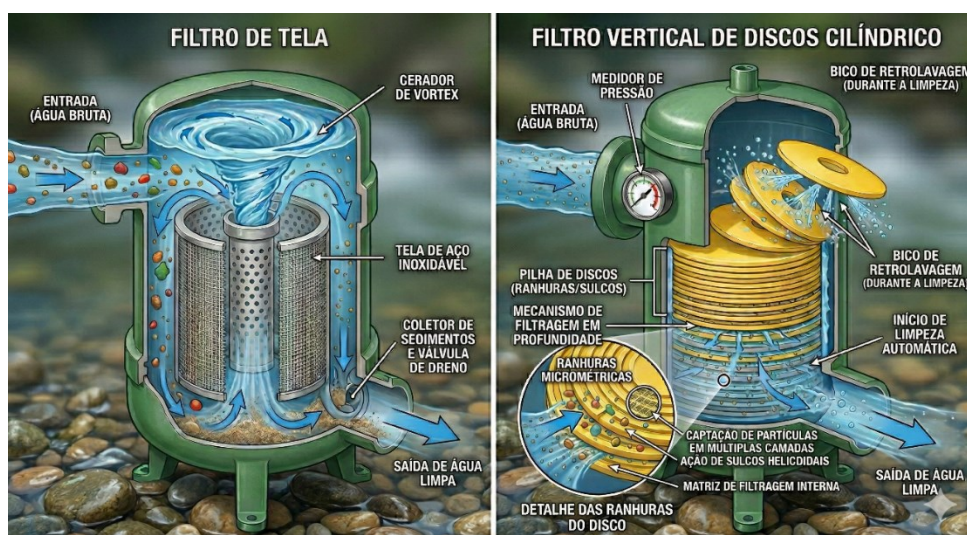
Com base nessa classificação, foi possível analisar que o tratamento NPK é o que reflete melhor desempenho dentre as quatro formas com todos os índices sendo superiores, e o PK sendo o pior dentre eles, porém, o EfPK possui classificação de transição, ou seja, possui equivalência estatística com o tratamento utilizando fertilizantes minerais, sendo essa diferença atribuídos a aleatoriedades, indicando sua viabilidade pelo grau de aproveitamento de efluentes e capacidade de melhoria até um o nível a. De mesma forma, ele também possui equivalência com o tratamento Ef, indicando que se mal otimizado, pode levar a condições piores que aquelas percebidas durante o plantio.

4.2 Avaliação do desempenho da filtragem aplicados na irrigação via gotejamento.

Neste segundo trabalho, foi realizado por Hasani *et al.* (2022) uma avaliação de três

sistemas de filtros para serem utilizados em sistemas de gotejamento para contornar o entupimento, principal problema desse tipo de irrigador. O experimento foi realizado em Sanandaj, no Irã, e o objeto de estudo foi o efluente de saída de tanques de cultivo da truta arco-íris (*Oncorhynchus mykiss*), rico em carga de sólidos e microbiológica. Foram utilizados três tipos de filtros, de discos, de telas convencional e de telas autolimpantes, sendo o de telas convencional o mais utilizado no país, que vem sendo substituído pelo filtro de telas autolimpantes na maioria dos sistemas de gotejamento, realizado em triplicata para os três filtros, cada um com duas pressões de trabalho com mesma vazão. A Figura 9 representa o corte longitudinal de filtros de tela e discos para visualização de seu interior.

Figura 9 – Representação dos filtros utilizados no experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026) com auxílio de Inteligência Artificial.

A Tabela 4 expõe as especificações de cada um dos filtros utilizado nesse experimento, enquanto que na Tabela 5 é mostrada a caracterização do efluente de saída em relação a água de entrada nos tanques de aquicultura.

Após a análise das características operacionais dos equipamentos e das propriedades físico-químicas do efluente, tornou-se necessário relacionar esses parâmetros com a eficiência de separação dos filtros com intuito de evitar o entupimento durante o gotejamento. É de suma importância observar o aumento da carga de sólidos suspensos totais após utilização na cultura de trutas, além do aumento do número de bactérias heterotróficas, sendo atribuído a metabolismo desses peixes, como suas excretas e resíduos alimentares não consumidos, ou seja, alta carga de resíduos orgânicos.

Tabela 4 – Especificações dos filtros.

Tipo do filtro	Pressão de Trabalho (kPa)	Vazão de trabalho (m³/h)	Perda de carga máxima permitida (kPa)
Filtro de Disco	150	30	70
	300	30	70
Filtro de Telas	150	12	50
	300	12	50
Filtro de Telas automatizado	200	30	40
	300	30	40

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

Tabela 5 – Propriedades físico-biológicas do efluente.

Propriedade	Parâmetro	Água de Entrada	Efluente de Saída
Física	Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	0,20 ± 0,03	10,99 ± 0,21
	pH	7,79 ± 0,50	7,68 ± 0,12
	Sólidos Solúveis Totais (mg/L)	381,00 ± 16,37	384,00 ± 5,29
Biológica	Número de bactérias heterotróficas (por mL)	377,40 ± 65,11	2363,60 ± 663,18

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

Por outro lado, diferentemente de sólidos inorgânicos, esses resíduos oriundos da criação de peixes sofrem deformação sob pressão, resultando em perda de carga na linha, algo que gerou diferenças significativas na eficiência entre os filtros estudados, relacionado com redução de vazão, possível aumento de energia para suprir obstruções dos filtros e diminuindo ciclos de trabalho, principalmente no filtro de tela autolimpante que precisou realizar retrolavagem em tempos menores do que o esperado. A Tabela 6 apresenta a eficiência de cada filtro utilizado durante o estudo.

Esses valores mostram que o filtro de disco foi o que teve melhor desempenho geral mesmo com uma eficiência ligeiramente menor que o filtro de telas, isso é verificado pela maior quantidade de filtrado retirado do efluente, da ordem de 100 m³/m² enquanto o filtro de telas ficou entre 17 m³/m². A perda de carga também foi significativamente menor, sugerindo menor consumo energético do sistema com filtros de disco e tornando o processo possivelmente menos oneroso.

Tabela 6 – Características de saída de cada filtro.

Tipo do filtro	Pressão de Trabalho (kPa)	Volume Médio Filtrado de Efluente (m^3/m^2)	Perda de carga acumulada (kPa)	Eficiência (%)	Massa média retida ($\text{g}/\text{min} \cdot \text{m}^2$)
Filtro de Disco	150	92	40	68	28
	300	105	40	61	
Filtro de Telas	150	16	150	73	9
	300	17,50	193,33	62	
Filtro de Telas automatizado	200	30	123,33	-5	7
	300	30	113,33	17	
Relação Disco-Tela	150	5,75	0,27	0,93	3,1
	300	6	0,21	0,98	

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

Esses valores mostram que o filtro de disco foi o que teve melhor desempenho geral mesmo com uma eficiência ligeiramente menor que o filtro de telas, isso é verificado pela maior quantidade de filtrado retirado do efluente, da ordem de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2$ enquanto o filtro de telas ficou entre $17 \text{ m}^3/\text{m}^2$. A perda de carga também foi significativamente menor, sugerindo menor consumo energético do sistema com filtros de disco e tornando o processo possivelmente menos oneroso.

A eficiência maior do filtro de telas pode se ter dado pela característica natural desse tipo de filtro, onde por possuir uma tela superior, a formação de torta é mais rápida e funciona como um segundo filtro por tempo maior de processo, diferentemente do disco que funciona com base na profundidade e normalmente leva um tempo maior para formação de uma torta filtradora pelo grande número de discos em seu interior.

Também vale ressaltar o filtro de telas automatizado, que possui pior desempenho entre os três, mesmos não realizando paradas para limpeza, diferente dos outros dois que precisam parar ao atingir a saturação do meio filtrante. Mesmo com essa vantagem, o filtro ainda se mostrou totalmente menos eficiente que os demais, isso pode se relacionar a mal otimização dos jatos de água para limpeza, atingindo a torta e forçando os sólidos, inicialmente filtrados, a se desprenderem da tela e misturar com a saída limpa, ou seja, contaminando o filtrado, o que explicaria a eficiência negativa de um desses filtros e baixa retenção de sólidos.

4.3 Comparação da produtividade entre cinco formas de tratamento para suplementação do solo.

Santos *et al.* (2006) realizaram um experimento na lavoura de quiabo, localizada na cidade de Campina Grande, Paraíba, que consistiu em avaliar três formas de suplementação do

solo utilizando esgotos sanitários da Companhia de Águas e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), em um solo classificado como arenoso, uma forma somente com água de abastecimento, chamada de testemunha, e uma forma tradicional com água de abastecimento e adubação mineral convencional para avaliar também a qualidade de suplementação durante 120 dias, com objetivo de avaliar a área foliar, a fitomassa e o comprimento dos vegetais ao longo desse período. As formas avaliadas T3, T4 e T5, foram apresentadas na Tabela 7 e representadas na Figura 10.

Figura 10 – Representação dos sistemas de pós-tratamento.



Fonte: Elaborada pelo autor (2026) com auxílio de Inteligência Artificial.

Tabela 7 – Caracterização de cada um dos pós-tratamentos.

Classificação	Característica
T1	Irrigação com água de abastecimento
T2	Irrigação com água de abastecimento e adubação mineral
T3	Irrigação com efluente da Lagoa de Polimento
T4	Irrigação com efluente do leito de brita
T5	Irrigação com efluente do reator UASB

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2006).

A análise das características dos efluentes mostram que o efluente exige alta carga de oxigênio para conseguir oxidar sua matéria orgânica, diminuído consideravelmente após processos de tratamentos, principalmente o leito de brita que consegue limpar o efluente com boa performance e remover todos ovos de helmintos, seguido da Lagoa que compartilha desse efeito, mas com uma eficiência na diminuição do DQO menor, possivelmente causada pela diferença de biofilme, com maior degradação da matéria orgânica por bactérias presentes nas pedras do leito de brita. O esgoto sanitário e efluentes utilizados foram caracterizados por análises físico-químicas, apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Características físico-químicas do esgoto e efluentes.

Parâmetros	Esgoto Bruto	UASB	Leito de Brita	Lagoa de Polimento
DQO (mg/L)	632,00 ± 181,0	242,0 ± 66,0	69,0 ± 26,0	122,0 ± 60
NTK (mg/L)	46,6 ± 10,8	41,0 ± 10,1	32,8 ± 9,5	9,8 ± 3,0
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	28,2 ± 7,6	40,4 ± 10,7	30,4 ± 9,0	4,5 ± 2,9
Fósforo Total (mg/L)	6,3 ± 1,3	6,1 ± 1,3	4,9 ± 1,8	3,7 ± 1,2
Faixa de pH	6,6 - 7,7	6,7 - 8	7,3 - 7,9	7,6 - 10,6
Coliformes Termotolerantes	1,7·10 ⁷	6,1·10 ⁶	7,2·10 ³	2,9·10 ¹
Ovos de helmintos (ovos por L)	217	143	0	0

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2006).

A análise da Tabela 8 revelou que as concentrações de NTK (nitrogênio total), nitrogênio amoniacal (nitrogênio dissolvido) e fósforo total variam drasticamente conforme o nível de pós-tratamento aplicado ao esgoto bruto. O reator UASB foi responsável por preservar a maior carga de nutrientes, algo extremamente valioso para fertirrigação, enquanto a lagoa de polimento apresenta menor viabilidade nutricional pela alta remoção de nitrogênio e fósforo. A Tabela 9 mostra a produtividade final do quiabo com cada um dos cinco tratamentos aplicados via fertirrigação.

Tabela 9 – Avaliação da produtividade da lavoura de quiabo.

Tratamento	Produtividade (t/ha)
T1	9,04 c
T2	27,85 a
T3	14,88 b
T4	24,72 ab
T5	25,75 ab

Nota: a,b e c são agrupamentos estatísticos e indicam, quando dois ou mais dados possuem a mesma letra, que não há diferença estatística entre eles.

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2006).

A análise de produtividade mostrou que o tratamento sem nutrientes foi o com menor produtividade, algo esperado pela ausência de suplementação nutricional do solo e falta de reposição daquilo que favorece todo processo de metabolismo vegetal. Por outro lado, a utilização de efluente tratado para fertilização se mostrou viável em termos de produtividade, porém a presença de ovos de helmintos após o tratamento do reator UASB, de acordo com a OMS, não foi adequado para uso via fertirrigação, enquanto para o a lagoa de polimento foi observada menor produtividade atrelado a redução severa de nutrientes importantes presentes no efluente. Por fim, o leito de brita se mostra como uma opção viável para pós-tratamento de efluentes sanitários, atuando com alta produtividade sem diferença significativa da irrigação com fertilizantes minerais, porém exigindo tratamento adicional para remoção de coliformes termotolerantes, que possui prioridade secundaria em relação aos ovos de helmintos.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusão

Pôde ser percebido a união entre fertirrigação, operações unitárias e controle ótimo de processos para análise de viabilidade de uso de efluentes na fertirrigação de lavouras, configurando uma estratégia importante na sociedade atual, a de recuperação de recursos com o máximo de reaproveitamento de resíduos, depósitos ou despejos que podem ser vistos inicialmente como algo sem utilidade.

O estudo de caso expõe essa substituição, principalmente com uso de efluentes sanitários que carregam consigo muita carga nitrogenada e, em menor quantidade, fósforo e potássio. Através do estudo da cultura do milho, foi evidenciado que efluentes sanitários tratados via fossas biodigestoras podem substituir integralmente a adubação nitrogenada mineral, atuando com produtividade de aproximadamente 9,8 toneladas por hectare plantado e irrigado, utilizando efluente como fonte de nitrogênio, representando cerca de 80,60% daquilo observado na produtividade com fertilizantes minerais, sendo um valor estatisticamente semelhante, com base no Teste de Tukey, e validando a possibilidade de ser um possível substituto.

No contexto geral de fertirrigação utilizando efluentes tratados, o entupimento é reconhecido como principal barreira de operação, e este trabalho mostra como a utilização de filtros pode ser eficiente para remoção de sólidos problemáticos na estrutura dos principais irrigadores, consolidando o filtro de disco como tecnologia robusta, que atua com alta taxa de matéria retida e eficiência.

Por outro lado, a automatização de filtros pode ser algo prejudicial quando mal projetado, como demonstrado no trabalho realizado por Hasani *et al.* (2022), onde o filtro que não realiza paradas para limpeza mostrou não só eficiências significativamente menores como menor que zero, ou seja, estava tornando a saída de filtrado mais concentrada que a entrada, expondo que processos automáticos nem sempre são sinônimos de eficácia.

Uma visão pautada em segurança sanitária também surge como algo vital nos dias de hoje, como mostrado pelo estudo da cultura de quiabo, onde o uso de formas diferentes de tratamento de esgoto bruto gera produtividade semelhantes estatisticamente, porém ultrapassa limites para alguns contaminantes monitorados por organizações sanitárias e que pode inviabilizar seu uso caso não seja utilizado alguma outra técnica para diminuição desses contaminantes.

Como observado no trabalho de Santos *et al.* (2006) durante seus estudos na lavoura de quiabo, a utilização de um leito de brita antes da fertirrigação rendeu alta produtividade de 24,72 toneladas por hectare, porém necessita de um processo para diminuição de coliformes, compartilhando essa característica com o reator UASB, que necessita de algo ainda mais eficiente para remoção também de ovos de helmintos, mas que ainda assim possibilitou atuação com média produtividade de 25,75 t/ha.

Portanto, o sucesso em termos de produtividade da fertirrigação utilizando efluentes exige um sistema que harmonize a utilização de rejeitos com operação ótima, amparado numa filtragem e controle rigorosos de parâmetros de segurança, com base em limites pré-estabelecidos por legislações, para evitar contaminação, visto que efluentes podem ser altamente carregados em material nocivo a vida humana e vegetal.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

É sugerido as seguintes linhas de pesquisa para aprofundar o estudo de fertirrigação utilizando efluentes tratados:

- Avaliação da adaptação do UASB: o reator anaeróbio de fluxo ascendente se mostrou uma opção viável de suplementação, porém não mostrou bons resultados na remoção de coliformes e helmintos. Um estudo visando uma técnica antes ou após o reator focada na remoção desses contaminantes perigosos pode ser algo interessante do ponto de vista produtivo.
- Otimização do filtro de tela: por ser um processo baseado na ausência de parada para limpeza, otimizar a questão focada na contaminação do filtrado pela torta, traria benefícios em ramos energéticos e produtividade, visto que a forma convencional entrega alta eficiência de remoção de sólidos sem o benefício de retrolimpeza.
- Criação de um sistema robusto de reaproveitamento: efluentes sanitários são ricos em nitrogênio, na questão de suplementação vegetal também se torna necessário potássio e fósforo para completar os macronutrientes. Estudo focados em criação de um sistema que cede todos esses nutrientes seria ideal, como a utilização de vinhaça sucroalcooleira como fonte de potássio e efluente de criação de suínos ou processamento de alimentos como fonte de fósforo, por exemplo.
- Análise de Acúmulo de Metais Pesados e Salinização: realização de estudos de longa duração para monitorar a condutividade elétrica do solo e a possível bioacumulação de metais pesados nos frutos, garantindo a segurança alimentar à população.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, P. A. da S. **Corn crop responds positively to fertigation with black water from sewage treated by decentralized anaerobic system.** Ciência e Agrotecnologia, v. 46, p. e001222, 2022.

BATISTA, R. O. et al. **Filtração de esgoto sanitário tratado destinado à fertirrigação via sistemas de irrigação por gotejamento.** Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v. 16, n. 3, p. 337-342, 2008.

BORGES, A. L.; SILVA, D. J. **Fertilizantes para fertirrigação.** Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2011. 41 p. (Embrapa Mandioca e Fruticultura. Documentos, 146).

DE TEVES INÁCIO, C. et al. **Precipitação de estruvita em lixiviado de compostagem para uso como fertilizante.** Revista Virtual de Química, v. 14, n. 5, p. 1104-1118, 2022.

FRIZZONE, J. A. et al. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão.** Pelotas: Ed. Universitária UFPel, 2012.

FRIZZONE, J. A. **Notas de Aula da disciplina LEB 1571 – Irrigação.** Piracicaba: ESALQ/USP, 2017.

GAVA, R. et al. **Eficiência de sistemas de aplicação de vinhaça visando economia e consciência ambiental.** Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 3, n. 1, p. 111-129, 2010.

HASANI, A. M. et al. **Performance of disc, conventional and automatic screen filters under rainbow trout fish farm effluent for drip irrigation system.** Environmental Science and Pollution Research, v. 29, n. 53, p. 80624-80636, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16075-2:2020: Guidelines for treated wastewater use for irrigation projects — Part 2: Development of the project.** 2. ed. Geneva: ISO, 2020.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design.** Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975. 133 p.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. New York: McGraw-Hill, 1967.

METCALF & EDDY; AECOM. **Wastewater engineering: treatment and resource recovery**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

OLIVEIRA, A. F. G. **Testes estatísticos para comparação de médias**. Revista Eletrônica Nutritime, v. 5, n. 6, p. 777-788, 2008.

PATERNIANI, J. E. S. et al. **Pré-filtração em pedregulho e filtração lenta com areia, manta não tecida e carvão ativado para polimento de efluentes domésticos tratados em leitos cultivados**. Engenharia Agrícola, v. 31, p. 803-812, 2011.

PITORO, Valdemiro et al. Efeito da fertirrigação com efluente de esgoto doméstico no desempenho de gotejadores autocompensantes. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 15, n. 2, p. 507-523, 2022.

SANTOS, K. D. et al. **Utilização de esgoto tratado na fertirrigação agrícola**. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 1, n. 1, p. 1-8, 2006.

SILVA, D. J.; SOARES, J. M. **Fertirrigação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2009. 232 p.

SILVA, E. R. da. **Uniformidade de distribuição de água em irrigação localizada com sistema de aeração, decantação e filtragem**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

SILVA, Francisco Matheus Teixeira da. **Avaliação do potencial de reúso de águas cinzas utilizando aplicativo em uma comunidade rural dos sertões de Crateús-CE**. Tese de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022.

SNOEYINK, V. L.; JENKINS, D. **Water chemistry**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

VAZ, Victor. Análise termoeconômica de uma planta rural de biogás integrada a um sistema de fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 26, n. 12, p. 891-898, dez. 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**: volume 2: wastewater use in agriculture. Geneva: World Health

Organization, 2006. 196 p.

YOYOTTE, J. O Egito faraônico: sociedade, economia e cultura. In: MOKHTAR, G. (ed.). **História geral da África, II: África antiga**. 2. ed. rev. Brasília: UNESCO, 2010.