



**LUCA NOPPER DE OLIVEIRA LEMOS**

**REMOÇÃO DE FÓSFORO POR PRECIPITAÇÃO QUÍMICA  
EM EFLUENTE SANITÁRIO GERADO EM UMA INDÚSTRIA  
AGROQUÍMICA**

**LAVRAS – MG  
2023**

**LUCA NOPPER DE OLIVEIRA LEMOS**

**REMOÇÃO DE FÓSFORO POR PRECIPITAÇÃO QUÍMICA EM  
EFLUENTE SANITÁRIO GERADO EM UMA INDÚSTRIA  
AGROQUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências  
do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a  
obtenção do título de Bacharel.

Profa. Dra. Paula Peixoto Assemany  
Orientadora

**LAVRAS – MG  
2023**

**LUCA NOPPER DE OLIVEIRA LEMOS**

**REMOÇÃO DE FÓSFORO POR PRECIPITAÇÃO QUÍMICA EM  
EFLUENTE SANITÁRIO GERADO EM UMA INDÚSTRIA  
AGROQUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências  
do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a  
obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 30 de novembro de 2023.  
Profa. Dra. Paula Peixoto Assemany  
Prof. Dr. Ronaldo Fia  
Prof. Dr. Mateus Pimentel de Matos

Profa. Dra. Paula Peixoto Assemany  
Orientadora

**LAVRAS – MG  
2023**

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram em todas as etapas da minha vida, à minha tia Denise, que me deu todo suporte durante a minha jornada acadêmica, e à minha irmã Juliana, que é a minha maior incentivadora e minha inspiração. Dedico também às minhas avós, Cleuza e Lilian, que sempre me inspiraram com sua dedicação e amor.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Luana e Maurício, por seu amor incondicional, apoio constante e sacrifícios incansáveis ao longo da minha jornada acadêmica.

À minha tia Denise, que sempre esteve presente com todo o incentivo durante minha formação.

À minha família de Campinas, Marcos, Nádia, Bruna e Maurício, por me acolherem em um momento tão importante para minha formação.

Às minhas amadas avós, Cleuza e Lílian, cujo carinho e encorajamento foram uma fonte constante de inspiração, e ao meu avô Antônio, pelo suporte aos estudos.

À minha irmã Juliana, minha maior apoiadora, cujo apoio inabalável e motivação me ajudaram a superar desafios e alcançar meus objetivos.

Ao Thyago, pela parceria e atenção em momentos de inseguranças, por me trazer paz. E a todos da minha família que, de alguma forma, me motivaram a seguir em frente em momentos difíceis.

Aos amigos de Lavras, especialmente aqueles que compartilharam moradia comigo e continuam a ser parte importante da minha vida, agradeço por cada momento compartilhado e pelo apoio mútuo. Vocês também serviram de inspiração para que, além de um ótimo profissional, eu também me tornasse um ser humano melhor.

Agradeço ao Preserva Júnior, onde tive a oportunidade de aprender e crescer, e por enriquecer minha experiência acadêmica e profissional. Meus dois anos na empresa me ensinaram muito sobre trabalho em equipe e a diferença que podemos fazer no mundo.

À minha orientadora, Paula Peixoto Assemany, pelo suporte dedicado, orientação valiosa e paciência durante todo o processo de elaboração deste trabalho. Obrigado por aceitar minha proposta e se mostrar tão presente durante todo o processo de criação. Sua sabedoria e conhecimento são inspiração.

Aos professores da UFLA, cujo conhecimento e ensinamentos moldaram minha trajetória acadêmica, e à própria Universidade Federal de Lavras, por proporcionar um ambiente de aprendizado enriquecedor, não só no âmbito acadêmico, mas também no social. A importância de um ensino público de qualidade vai muito além da formação profissional, por isso a necessidade de profissionais sensíveis a diferentes realidades.

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a minha jornada acadêmica. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio e a influência de cada um de vocês.

## RESUMO

Devido à escassez hídrica global, é crucial explorar fontes alternativas de água, especialmente para setores que consomem significativas quantidades desse recurso, como a indústria. O reúso da água emerge como uma alternativa para mitigar o problema da disponibilidade hídrica, contudo, a qualidade deve ser assegurada de acordo com a finalidade de uso e seus parâmetros específicos. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da remoção de fósforo no efluente sanitário tratado (água de reúso) proveniente da estação de tratamento de efluentes de uma indústria agroquímica, utilizando hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) como precipitador químico. O experimento foi conduzido em nível de bancada com o equipamento "Jar-test", avaliando a eficiência de remoção em diferentes valores de pH (9, 10, 11 e 12). Mantiveram-se condições de agitação rápida, lenta e decantação para todos os valores de pH e os ensaios foram realizados em triplicata. O efluente utilizado para análise foi o efluente sanitário tratado (água de reúso), produzida pela estação de tratamento da empresa, responsável pelo tratamento diário de todo o efluente sanitário gerado na indústria. As amostras foram avaliadas quanto às variáveis de potencial hidrogeniônico (pH), turbidez e concentração de fósforo antes e após o tratamento químico. Os resultados foram estatisticamente analisados pelo software RStudio, utilizando os métodos de normalidade de Shapiro-Wilk e teste de Tukey para a análise de diferença estatística entre as médias. Todos os valores médios foram considerados normais, e não houve diferença estatística relevante nos valores de concentração de fósforo para os pH 10, 11 e 12. O método de precipitação química com hidróxido de cálcio como precipitador químico mostrou-se eficaz na remoção de fósforo em efluentes tratados, sendo o pH 10 considerado ideal com uma eficiência de remoção de 87%. Embora o hidróxido de cálcio possa ser utilizado para o tratamento químico de remoção de fósforo, estudos adicionais são necessários para avaliar a viabilidade econômica do processo e explorar outros precipitadores químicos que possam apresentar eficiências mais elevadas visto que o tratamento com hidróxido de cálcio não conseguiu atingir o limite imposto pela CETESB para descarte no curso d'água.

**Palavras-chave:** Tratamento químico. Tratamento de águas residuárias. Reúso de água. Ensaio de precipitação de fósforo.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma de produção de defensivos agrícolas. ....	13
Figura 2 – Usos consuntivos setoriais e evaporação líquida no Brasil.....	17
Figura 3 – Fluxograma da estação de tratamento de efluentes.....	25
Figura 4 – Demonstração do procedimento de controle de pH conforme adição de solução. .	27
Figura 5 – Método Hach para determinação de fósforo total. ....	29
Figura 6 – Eficiência de remoção de fósforo para os diferentes valores de pH. ....	31
Figura 7 – Início do processo de decantação no jarro 1 para o pH9 e pH10 (A e B) e 2 para o pH 11(C).....	32
Figura 8 – Visualização dos tubos com as amostras dos diferentes ensaios de precipitação química do efluente em estudo durante a realização da análise de fósforo.....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Legislações e parâmetros de lançamento de efluente em curso d'água. ....	15
Tabela 2 – Estudos relacionados a precipitação química de fósforo e suas respectivas informações. ....	24
Tabela 3 – Caracterização do efluente tratado e porcentagens de remoção da estação de tratamento de esgoto (médias e desvio padrão).....	27
Tabela 4 – Caracterização do efluente de estudos (água de reúso) (valores médios). ....	31
Tabela 5 – Resultados analíticos após precipitação química com hidróxido de cálcio em diferentes valores de pH (valores médios e desvio padrão). ....	31



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>Indústria agroquímica</b> .....	<b>12</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Impactos ambientais da indústria agroquímica</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>Gestão de recursos hídricos em ambiente industrial</b> .....	<b>16</b>
<b>3.3</b>	<b>Água de reúso em indústrias</b> .....	<b>19</b>
<b>3.4</b>	<b>Métodos de remoção de fósforo em águas residuárias</b> .....	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização da empresa</b> .....	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Caracterização da estação de tratamento</b> .....	<b>25</b>
<b>4.3</b>	<b>Procedimento experimental</b> .....	<b>27</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise de dados e interpretação</b> .....	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>34</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a preservação dos recursos naturais tem colocado em destaque a importância da gestão responsável dos recursos hídricos em todo o mundo. De acordo com o último relatório da Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura (UNESCO), 3,6 bilhões de pessoas não possuem acesso a serviços de saneamento seguros e 26% da população mundial não tem acesso a água potável (ONU, 2023). O acesso à água potável é uma necessidade fundamental para a vida humana, o meio ambiente, os animais, mas também para a agricultura e processos industriais.

A indústria agroquímica, por exemplo, impulsionada pela necessidade de alimentar uma população em constante crescimento, desempenha um papel fundamental na produção de alimentos em larga escala. No entanto, sua operação, frequentemente, envolve o uso intensivo de recursos hídricos e a geração de efluentes que podem ter impactos negativos significativos no ambiente aquático. Um dado importante é que no mundo este setor é responsável por 22% do consumo total de água (CAFÉ POINT, 2022). Dada a magnitude do efeito deste setor é importante buscar alternativas que possibilitem a mitigação do impacto causado.

Uma alternativa para redução deste impacto é a geração de água de reúso e sua utilização e destinação eficiente e sustentável, se tornando uma prioridade, não apenas como um ato de responsabilidade ambiental, mas também como um requisito de economia. Porém, compreende-se que é de extrema importância que fontes alternativas, como a água de reúso, passem por uma delicada avaliação em relação a viabilidade técnico-econômica, juntamente com o desenvolvimento e aplicação de elementos que suportem e subsidiem o planejamento com outras soluções, para que a destinação deste recurso possa ocorrer de maneira correta, de acordo com os usos disponíveis (FUKASAWA, MIERZWA, 2020).

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) afirma que a água de reúso pode ser utilizada para diversas finalidades, como em irrigação paisagística, irrigação de campos para cultivos, recarga de aquíferos, usos urbanos não-potáveis e usos industriais (CETESB, 2018). Todavia, a sua utilização deve ser feita em acordo com as especificações impostas pelas companhias ambientais ou pela própria empresa que fará a utilização desta água. Tal circunstância é um fator dificultador, pois abre margem para diversos desafios enfrentados pela prática do reúso.

Um destes desafios é garantir que todos os parâmetros da água estejam de acordo com a qualidade imposta pelos órgãos reguladores e empresa, de acordo com a finalidade do uso. Um exemplo é a concentração de nutrientes no efluente, como o fósforo. Altas concentrações

deste e seu descarte contínuo podem resultar em consequências significativas para os corpos d'água (CADONÁ *et al.*, 2018). Um exemplo notável é a eutrofização, um processo no qual a elevada concentração de nutrientes na água pode desencadear um crescimento descontrolado de organismos fotossintetizantes que, por consequência, criam um ambiente de instabilidade de oxigênio e reduzem a diversidade de espécies presentes no corpo aquático (SILVA; MARTINS, 2016). Por outro lado, elevadas concentrações de nutrientes, incluindo o fósforo, podem ser desejáveis quando a água de reúso é destinada à prática de fertirrigação de lavouras. Para usos industriais, como uso em torres de resfriamento, caldeiras, lavagem de utensílios e maquinários e incorporação de água no produto, as concentrações de substâncias químicas na água geralmente são limitadas, visando não comprometer a qualidade do processo industrial (LEGNER, 2021).

Nesse contexto, este trabalho de conclusão de curso busca não apenas explorar a possibilidade de remoção eficaz de nutrientes, como o fósforo, em estações de geração de água para reúso, mas também avaliar se a precipitação química pode atender ao rigoroso limite imposto pela CETESB, como condicionante para a licença de operação da estação de tratamento de efluentes, de 0,03mg/l de fósforo para descarte em curso d'água. Nesse contexto, este trabalho de conclusão de curso, ao explorar a possibilidade de remoção eficaz de nutrientes, como o fósforo, em estações de geração de água para reúso, busca fornecer uma contribuição valiosa para abordar esses desafios críticos. Além disso, ao considerar a importância do cumprimento das regulamentações ambientais, este estudo visa aprimorar as práticas de controle de qualidade, fortalecendo a sustentabilidade ambiental e econômica, e criando impactos positivos tangíveis tanto para o setor industrial quanto para o meio ambiente, ao mesmo tempo em que busca viabilizar técnicas que respeitem os limites estabelecidos para proteção dos recursos hídricos.

## **2 OBJETIVOS**

Avaliar a remoção de fósforo por precipitação química em efluente sanitário, gerado em uma indústria agroquímica.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Avaliar, em nível de bancada, a remoção por precipitação química do fósforo com hidróxido de cálcio;
- Avaliar a influência de diferentes valores de pH na eficiência de remoção de fósforo por precipitação química com hidróxido de cálcio.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Indústria agroquímica

A indústria agroquímica desempenha um papel fundamental na sociedade contemporânea, devido a imperativa necessidade de produzir alimentos em grande escala. Esse método de produção se tornou indispensável devido a sensibilidade de certas culturas, como frutas e hortaliças, às pragas. No contexto brasileiro, isso é ainda mais notável, uma vez que as condições climáticas favorecem a proliferação e sobrevivência dessas pragas (LANA; CASIMIRO, 2022). Além disso, o setor apresenta grande importância socioeconômica, na movimentação de renda e oferta de emprego.

De acordo com Lammel (2018), a indústria agroquímica, em 2018, representava 32% do PIB nacional e era responsável pela geração de mais de 30 milhões de empregos. Neste mesmo ano, o crescimento do PIB, em relação ao ano anterior (2017), foi de 0,4% (LAMMEL, 2018). A Associação Nacional das Empresas de Produtos Fitossanitários (AENDA) reportou que, em 2019, a indústria agroquímica movimentou cerca de 13,7 bilhões de dólares, o que equivalia a 54,8 bilhões de reais (AENDA, 2019). Porém, ainda existe margem para crescimento deste setor no Brasil.

Dados da Coordenação Geral de Agrotóxicos e Afins (CGAA) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) informam que, em 2020, apenas 28 das 577 fábricas habilitadas para fornecer ingredientes ativos (IA) para o Brasil estavam situadas em território nacional (LEAL, 2021). Esse insumo é essencial para produção dos diferentes tipos de defensivos existentes, que podem variar desde inseticidas, herbicidas e fungicidas, que são os mais comuns, até controle biológico (LIGNANI; BRANDÃO, 2022). A seguir, cada um destes produtos é detalhado.

**Herbicidas:** produtos desenvolvidos para eliminar ou inibir o crescimento de plantas daninhas, os quais podem ser categorizados com base em sua ação (contato ou sistêmica), aplicação (no solo, pré-emergência ou pós-emergência) e em como afetam o mecanismo bioquímico das plantas. Além disso, podem ser divididos em herbicidas não seletivos, que afetam todas as plantas, e herbicidas seletivos, que direcionam sua ação apenas para as pragas, protegendo as culturas desejadas (BNDES, 2012).

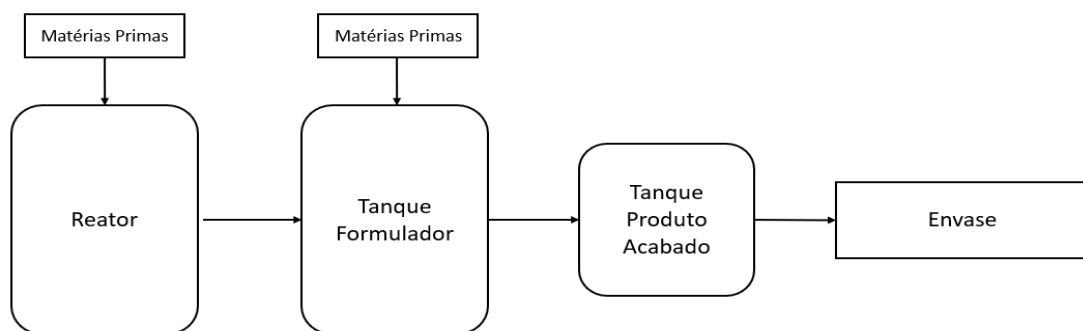
**Fungicidas:** são substâncias físicas, químicas ou biológicas, desenvolvidas para controlar fungos, além de ter a capacidade de erradicar plantas parasitas e organismos similares (BNDES, 2012).

Inseticidas: são substâncias químicas ou agentes biológicos, desenvolvidos para erradicar insetos, e podem ser classificados em três categorias principais: compostos organossintéticos, substâncias inorgânicas e bioinseticidas de origem botânica (BNDES, 2012).

Controle biológico: organismos vivos que exercem sua ação por meio de interações biológicas, como parasitismo ou competição, contra as pragas (BNDES, 2012).

O processo produtivo de defensivos agrícolas é demasiadamente complexo e varia de acordo com o produto, tipo e método produtivo. Mas de maneira simplificada, pode-se descrever o fluxo de acordo com a Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma de produção de defensivos agrícolas.



Fonte: Chaves e Finzer (2018).

De maneira geral, primeiramente, ocorre a adição de matérias-primas ao reator, onde ocorrem as primeiras reações. Após este procedimento inicial, o produto segue para os tanques de formulação, onde pode ocorrer a adição de mais matérias-primas para, posteriormente, seguir para o tanque de produto acabado e, em seguida, o envase, que seria o fracionamento deste produto em embalagens (CHAVES; FINZER, 2018).

### 3.1.2 Impactos ambientais da indústria agroquímica

Dada a complexidade da produção de defensivos agrícolas é evidente o impacto ambiental que este setor gera. Um exemplo disso é a geração de resíduos. Os resíduos agroindustriais surgem durante o processamento de alimentos, fibras, álcool, defensivos, entre outros. Além disso, sua produção é, geralmente, sazonal, dependendo da maturidade da cultura ou da disponibilidade de matéria-prima. As águas residuárias podem se originar da lavagem de produtos, escaldamento, cozimento, pasteurização, resfriamento e/ou da limpeza de equipamentos de processamento e instalações. Já os resíduos sólidos, incluem sobras de

processo, descartes, embalagens, lodo de sistemas de tratamento de águas residuais, além do lixo gerado no refeitório, pátio e escritório da agroindústria (COSTA FILHO *et al.*, 2017).

Pode-se observar, inclusive, os impactos ambientais nos recursos hídricos. Para além do consumo, as indústrias de defensivos podem prejudicar corpos d'água, a partir da emissão de efluentes. Assim, devem atentar-se ao tratamento dos efluentes gerados e respeitar os padrões de emissão de acordo com as legislações locais (SPADOTTO; RIBEIRO, 2006).

Para o Estado de São Paulo, pode-se citar duas legislações: i) a Resolução Conama nº 430, de 16 de maio de 2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, bem como complementa e altera a Resolução nº 357 (BRASIL, 2011; BRASIL, 2005), e ii) o Decreto CETESB nº 8.468, de 08 de setembro de 1976, que aprova o regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, a qual dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente (SÃO PAULO, 1976). As informações de limitações de emissão de efluentes sanitários encontradas na Resolução 430 e no Decreto 8.468 estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Padrão de lançamento de efluente em curso d'água conforme legislações pertinentes. (continua)

Parâmetro	Legislação	
	Decreto nº 8.468/76 (Classe 2)	Resolução Conama nº 430/11
	Limites	
Óleos minerais	-	20 mg/L
Óleos vegetais e gorduras animais	-	50 mg/L
Materiais flutuantes	0	0
pH	-	5,0 a 9,0
Temperatura	-	40°C
Sólidos sedimentáveis	-	1 ml/L
Demanda bioquímica de oxigênio	5 mg/L	60% de remoção
Oxigênio Dissolvido	> 5 mg/L	-
Coliformes fecais	10000/L	-
Amônia	0,5 mg/L de N	-
Arsênio total	0,1 mg/L	0,5 mg/L As
Bário total	1,0 mg/L	5,0 mg/L Ba
Boro total	-	5,0 mg/L B

Cádmio total	0,01 mg/L	0,2 mg/L Cd
Chumbo total	0,1 mg/L	0,5 mg/L Pb
Cianeto total	-	1,0 mg/L CN
Cianeto livre	0,2 mg/L	0,2 mg/L CN
Cobre dissolvido	1,0 mg/L	1,0 mg/L Cu
Cromo hexavalente	0,05 mg/L	0,1 mg/L Cr+6
Cromo trivalente	-	1,0 mg/L Cr+3
Cromo total	-	-
Estanho total	2,0 mg/L	4,0 mg/L Sn
Fenóis	0,001 mg/L	-
Ferro dissolvido	-	15,0 mg/L Fe
Flúor	1,4 mg/L	-
Fluoreto total	-	10,0 mg/L F
Manganês dissolvido	-	1,0 mg/L Mn
Mercúrio total	0,002 mg/L	0,01 mg/L Hg
Níquel total	-	2,0 mg/L Ni
Nitrato	10,0 mg/L de N	-
Nitrito	1,0 mg/L de N	-
Nitrogênio amoniacal	-	20,0 mg/L N
Prata total	-	0,1 mg/L Ag
Selênio total	0,01 mg/L	0,30 mg/L Se
Sulfeto	-	1,0 mg/L S
Zinco total	5,0 mg/L	5,0 mg/L Zn
Parâmetros Orgânicos	-	Valores máximos
Benzeno	-	1,2 mg/L
Clorofórmio	-	1,0 mg/L
Dicloroetano	-	1,0 mg/L
Estireno	-	0,07 mg/L
Etilbenzeno	-	0,84 mg/L
Fenóis totais	-	0,5 mg/L C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH



Tetracloroeto de Carbono	-	1,0 mg/L
Tricloroeteno	-	1,0 mg/L
Tolueno	-	1,2 mg/L
Xileno	-	1,6 mg/L

(conclusão)

Fonte: Adaptado de CONAMA (2011) e CETESB (1976).

Diante do potencial causador de impactos ambientais negativos, as indústrias de defensivos vêm, ao longo dos anos, adotando práticas cada vez mais sustentáveis. De acordo com o estudo de Macedo *et al.* (2011), que fez uma análise das empresas entre os anos de 2005 e 2009, foi observado que existe uma busca pelo equilíbrio entre as empresas e os recursos por elas utilizados, visando a prevenção de futura escassez. Segundo os autores, o mercado e a sociedade exigem cada vez mais a consciência da preservação do meio ambiente, aliada a um retorno esperado em relação ao risco do capital investido (MACEDO *et al.*, 2011). Além da preservação ambiental, adotar práticas sustentáveis pode trazer benefícios financeiros à empresa, basta ter criatividade e adotar medidas internas que tenham potencial para transformar ameaças e restrições ambientais em negócio (DONAIRE, 2009).

Dessa forma, é importante que as empresas estabeleçam um sistema de gestão ambiental que reforce a formulação de diretrizes, definição de objetivos, coordenação de atividades e a avaliação de resultados. Além disso, que envolva diversos segmentos da organização para abordar os problemas ambientais de maneira integrada com as demais atividades (ANTÔNIO, 2011). Ademais, a Confederação Nacional da Indústria (CNI) definiu um plano para indústrias sustentáveis, que envolve alguns pontos, sendo eles: a bioeconomia, a economia circular, a sustentabilidade ambiental, social e de governança corporativa, a gestão florestal, o licenciamento ambiental, a gestão de mudanças climáticas, a gestão de resíduos sólidos, a eficiência energética e a gestão de recursos hídricos (CNI, 2023).

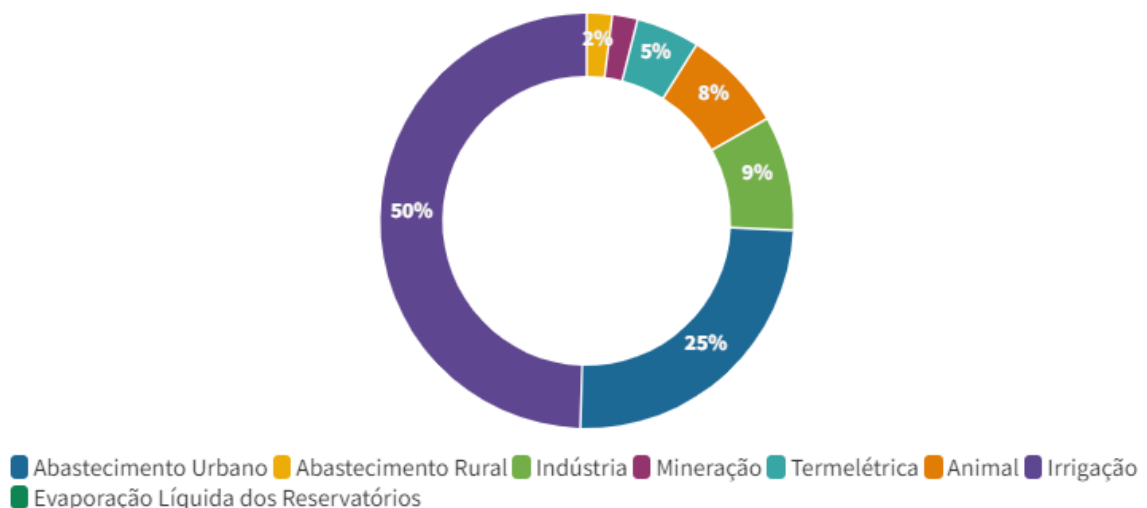
Dentro dos pontos citados, existem algumas práticas que, ao longo dos anos, vêm tomando maiores proporções relacionadas à gestão ambiental. Alguns exemplos são: a reciclagem de resíduos sólidos ou destinações mais sustentáveis, como o coprocessamento, as tecnologias de redução de desperdício e retrabalho, como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), a transição energética para fontes renováveis, como energia solar e eólica, e o próprio reúso de água tratada (BARRETO, 2021).

### **3.2 Gestão de recursos hídricos em ambiente industrial**

Os recursos hídricos desempenham um papel fundamental na sustentabilidade ambiental e economia global. A água é um recurso precioso, vital para a sobrevivência de todas as formas de vida e para o funcionamento da sociedade como um todo, sendo essencial para muitos setores da economia, como, por exemplo, a agricultura, a produção de energia, a manufatura e a indústria. Atualmente, o mundo enfrenta desafios significativos relacionados à gestão adequada da água, devido a crescente poluição hídrica e o aumento do consumo. Além disso, é esperado que estes desafios se intensifiquem, pois há um aumento previsto de 42% das retiradas de água entre 2020 e 2040 (ANA, 2021).

Estima-se que, em 2020, foram captados para o abastecimento do Brasil, cerca de 1.947m<sup>3</sup>/s de água. Deste valor, 50% foi destinado para irrigação, 25% para consumo urbano, 8% para animais e 9% para indústrias (Figura 2). O uso industrial foi responsável por uma captação de 184 m<sup>3</sup>/s, sendo que a porcentagem deste valor que retornou para os corpos de água não chegou a 50% (ANA, 2021). É evidente o impacto que o consumo humano e processos industriais causam na disponibilidade hídrica. Assim, a escassez de água e a poluição desta ameaçam não apenas o meio ambiente, mas também a estabilidade econômica e social, reforçando a urgência de soluções apropriadas (BILOTTA, 2021).

Figura 2 – Usos consuntivos setoriais e evaporação líquida no Brasil.



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021).

Com isso em mente, é importante lembrar da preocupação do Poder Público com a disponibilidade hídrica e os esforços e medidas que vêm sendo adotados ao longo dos anos. Um bom exemplo é a aprovação da “Lei das Águas” (Lei nº 9.433/97) em 1997, que estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento

de Recursos Hídricos – SINGREH (BRASIL, 1997). A CNI afirma que a indústria participa ativamente da implantação da PNRH e do SINGREH e que assume responsabilidade em todos os colegiados, com apoio a comitês nacionais e estaduais de bacias hidrográficas e recursos hídricos (CNI, 2013).

É importante a participação da indústria no âmbito de preservação das águas, tendo em vista que este setor é um dos que mais gera impactos sobre os recursos hídricos, além do fato de a água ser uma matéria-prima crucial para diversos processos industriais, como, por exemplo, no transporte, fluido de aquecimento ou refrigeração e nos processos de descontaminação (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Os impactos do setor industrial não são apenas na captação de água, mas também na geração de efluentes. A poluição hídrica, resultante do descarte inadequado de resíduos industriais e domésticos, é uma das principais ameaças atuais aos recursos hídricos, por apresentar impactos amplos, devido a diversidade dos resíduos gerados (MORAES; JORDÃO, 2002). No decorrer dos anos, é possível identificar uma crescente na conscientização do setor industrial, referente à gestão adequada e sustentável das águas.

A gestão sustentável da água na indústria é essencial, não apenas para atender as demandas operacionais, mas também para reduzir o impacto ambiental e melhorar a imagem da empresa perante o mercado. A CNI afirma que, ao longo dos anos, as empresas que adotam práticas conservacionistas agregaram valor e segurança a seus ativos, além de terem atingido respostas melhores do mercado financeiro, com maior retorno de investidores (CNI, 2017).

É possível atingir esse retorno de diversas maneiras, como, por exemplo, utilizando uma gestão eficaz da água industrial, envolvendo e adotando tecnologias avançadas como estratégias de conservação, monitoramento constante e sistemas de reciclagem de água. O reúso ou reciclagem, de uma maneira geral, envolve o processo de retorno de insumos ou materiais já utilizados, através de um tratamento, para a linha produtiva ou um outro processo dentro da mesma planta (GOMES *et al.*, 2020).

A recirculação e o reúso na indústria é uma prática viável de implementação e se mostra eficiente na conservação da água. Ela envolve dar uma nova utilidade a esse recurso, quando ele mantém a qualidade adequada. Essas técnicas podem ser aplicadas em diversas áreas, como na refrigeração de equipamentos, higienização de instalações, formulação e, até mesmo, como parte do processo de descarga sanitária. Além disso, a água reciclada tem aplicação em setores como a produção de metais, indústrias têxteis, químicas e de papel (GOMES *et al.*, 2020).

A gestão de recursos hídricos em ambientes industriais é um desafio crítico que requer a colaboração entre setores público e privado. A adoção de tecnologias inovadoras, como a água

de reúso, é essencial para preservar a água, visto esta ser um recurso valioso para as gerações presentes e futuras. Porém, é evidente que essa prática ainda não é utilizada na intensidade que deveria. A revista Monitor Mercantil (2021) afirma, que em 2018, a porcentagem referente à utilização de água de reúso, em relação ao consumo de água no Brasil, era de apenas 1%. Para que este recurso seja melhor aproveitado, é essencial entender os processos e usos envolvendo a água de reúso.

### **3.3 Água de reúso em indústrias**

A geração de água de reúso em indústrias tem emergido como uma estratégia crítica para enfrentar os desafios crescentes relacionados a disponibilidade de recursos hídricos e a sustentabilidade ambiental. Esse tipo de água é obtido a partir do tratamento de efluentes com tratamentos mais convencionais e etapas mais complexas. Esses tratamentos especializados podem envolver diversos processos, dentre eles, os mais comuns são a eletrólise reversa, troca iônica, precipitação química e filtração por membranas (MOURA *et al.*, 2020).

Dados os diferentes tipos de tratamento em relação à demanda específica para utilização da água, é possível gerar águas de reúso com diversas qualidades e características. Segundo a NBR 13.969/97 estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a prática de reúso de água de efluentes domésticos pode ser classificada em três categorias, sendo elas: reúso local, reúso indireto e reúso direto planejado (ABNT, 1997).

Reúso local: esse tipo de água é gerado a partir de efluente proveniente de fontes domésticas ou com características semelhantes. Após devidamente tratado, pode ser reaproveitado para fins que requerem água com qualidade não adequada para consumo humano, mas que seja segura do ponto de vista sanitário. Esses usos incluem a irrigação, a limpeza de pisos e veículos, o acionamento de descargas de vasos sanitários, a manutenção paisagística de lagos e canais, a utilização em pastagens e diversas outras aplicações. O nível de tratamento necessário varia desde uma simples recirculação da água de enxágue de máquinas de lavar, para utilização em vasos sanitários, até a remoção avançada de poluentes (ABNT, 1997).

Reúso indireto: ocorre quando efluentes, tratados ou não, são liberados em corpos d'água superficiais ou subterrâneos, onde vão estar sujeitos às ações dos processos naturais do ciclo hidrológico, incluindo a depuração e autodepuração, e, posteriormente, serão captados para uso novamente. Isso pode ocorrer de forma intencional, em que o efluente tratado é despejado a montante para ser recaptado a jusante (reúso indireto planejado), ou de forma não intencional, em que o efluente é descartado e, posteriormente captado, mas sem nenhum tipo

de controle (reúso indireto não planejado) (ABNT, 1997).

Reúso direto: acontece quando os resíduos líquidos, após passarem por processos de tratamento, são transportados diretamente da saída do tratamento até o destino de reutilização, sem serem liberados no ambiente. Isso é bastante comum, com a finalidade principal de ser utilizado na indústria ou para fins de irrigação (ABNT, 1997).

Com base nos diferentes tipos de água de reúso possíveis, podemos citar alguns setores industriais onde a água de reúso pode ser utilizada, dentre eles, a indústria alimentícia, indústria têxtil e a indústria agroquímica. Na indústria de alimentos e bebidas, a água de reúso pode ser usada para limpeza, resfriamento e produção de vapor em caldeiras, reduzindo o consumo de água fresca e minimizando o impacto ambiental (COSTA; OLIVEIRA; LIMA, 2014). Na indústria têxtil, a reciclagem de água é comum, economizando grandes volumes de água utilizados em processos de tingimento e acabamento de tecidos (TWARDOKUS, 2004). Por fim, na indústria agroquímica, a água tem diversas funções, sendo essencial para o funcionamento das plantas produtivas. A água é utilizada como matéria-prima, mas também pode servir no transporte de produtos, como fluido de resfriamento em torres ou de aquecimento em caldeiras, bem como, pode ser utilizada para descontaminação de plantas produtivas, dentre outros usos (BARBOSA *et al.*, 2021)

A geração de água de reúso em indústrias desempenha um papel crítico na mitigação da escassez hídrica e na redução da pegada hídrica das operações industriais. Além disso, contribui para a preservação dos ecossistemas aquáticos, ao minimizar a descarga de efluentes poluentes. A utilização de água de reúso nas indústrias é uma prática bem aceita em diversos países e assim praticada por eles, porém, depende do tipo de água. Utilização de águas de reúso para fins potáveis ainda é uma prática em desenvolvimento e, portanto, menos explorada (CALDA; SAMUDIO, 2016).

Apesar da água de reúso se mostrar como uma boa alternativa para diminuir os impactos industriais sobre a disponibilidade hídrica, segundo Calda e Samudio (2016), esta prática, no Brasil, continua longe de se concretizar. Diversos são os motivos que levam a este panorama, dentre eles, pode-se citar a abundância dos recursos hídricos no país, a precariedade e o déficit dos tratamentos de efluentes comuns e a falta de normas e legislações sobre o tema (BRITO *et al.*, 2012).

Dentre as legislações e normativas que existem, pode-se citar as principais: Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que dispõe sobre as diretrizes, modalidades e critérios para prática do reúso direto não potável e de outras providências (BRASIL, 2005); a NBR 13969:1997, da Associação Brasileira de Normas

Técnicas, que especifica os parâmetros de qualidade da água para alguns tipos de uso, mas não inclui o uso industrial (ABNT, 1997); e a Resolução Conjunta SES/SMA/SSRH nº 01, de 28 de junho de 2017, que disciplina o reúso direto não potável de água para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário e dá providências correlatas (SÃO PAULO, 2017).

A Resolução nº 54, de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, cita o uso na indústria, mas não estabelece parâmetros de qualidade e nem especificações para este tipo de uso (MOURA *et al.*, 2020). Portanto, é evidente a necessidade de novas legislações e normativas, visto que, atualmente, as especificações do uso deste tipo de água se encontram muito descentralizadas.

### **3.4 Métodos de remoção de fósforo em águas residuárias**

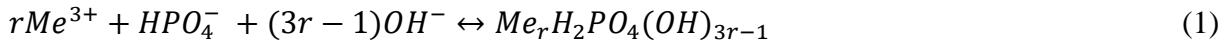
A remoção eficaz de fósforo de águas residuárias é crucial para evitar a eutrofização de corpos d'água, um problema ambiental sério (YANG *et al.*, 2010). A remoção é também necessária para garantir a qualidade da água de reúso de acordo com sua utilização desejada. Existem vários métodos de remoção de fósforo e eles podem ser classificados em dois grupos: tratamentos biológicos e tratamentos físico-químicos (RUBIM, 2017).

As técnicas de remoção biológica de fósforo dependem da habilidade de certas bactérias heterotróficas encontradas na biomassa ativa dos lodos ativados, as quais são capazes de acumular fosfato solúvel, na forma de polifosfatos, dentro de suas células, desde que as condições ideais para o seu crescimento e metabolismo estejam presentes (WANG *et al.*, 2008). Os tratamentos biológicos envolvem, geralmente, a combinação de condições anaeróbias, anóxicas e aeradas, que funcionam complementarmente para a remoção do fósforo (SILVA; MARTINS, 2016). Este é um procedimento que depende do estabelecimento de condições ideais para ação dos microrganismos, diferentemente do processo de precipitação química, que utiliza de outros recursos, como a adição de reagentes químicos.

A precipitação química do fósforo envolve, basicamente, adição de cal (CaO) ou cal hidratado (Ca(OH)<sub>2</sub>), sulfato de alumínio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) ou cloreto férrico (FeCl<sub>3</sub>) ao efluente. A aplicação destes compostos pode ocorrer em diversas fases do tratamento, podendo ser adicionados antes do tratamento primário, após o tratamento primário e antes do secundário ou, até mesmo, como um tratamento terciário. No último caso, é necessário a instalação de uma etapa a mais para o tratamento do efluente, porém, é o que gera melhores resultados em relação a remoção do fósforo (MOTA; VON SPERLING, 2009).

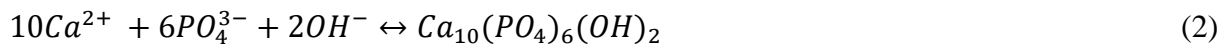
De acordo com MetCalf e Eddy (2014), a precipitação do fósforo, utilizando os sais metálicos e o cálcio podem ser descritos de acordo com as Equações 1 e 2:

Precipitação do fósforo com sais metálicos:



Onde: Me é referente ao metal, r = 1,6 para ferro e 0,8 para alumínio.

Precipitação do fósforo com cálcio:



Entretanto, existem alguns desafios e parâmetros que podem dificultar este processo. No caso dos sais metálicos, um pH acima de 5 pode ocasionar diversas reações paralelas que interferem na reação de sedimentação do fósforo, além disso, a reação pode ser afetada pela alcalinidade, presença de elementos traço e ligantes orgânicos (METCALF; EDDY, 2014).

Já para o cálcio, o pH é uma determinante importante, visto que a reação ocorre de maneira mais efetiva em um pH mais elevado, geralmente sendo ótimo em torno de pH 9, para adição a montante da decantação primária, e pH 11, para tratamentos com cal após tratamento secundário. Outros pontos são a alcalinidade do meio, o grau de remoção esperado e a quantidade de cálcio dosado, que costuma ser de 1,4 a 1,5 vezes a alcalinidade expressa em  $CaCO_3$ . Porém, a quantidade ideal costuma ser atingida a partir de ensaios de bancada (METCALF; EDDY, 2014).

Na literatura, pode-se encontrar diversos estudos que abordam a remoção de fósforo via uso dos sais metálicos ou cal. Alguns estudos estão descritos na Tabela 2, assim como suas especificações em relação aos melhores resultados obtidos.

Tabela 2 – Estudos relacionados a precipitação química de fósforo e suas respectivas informações.

Estudo	Produto químico	pH	Alcalinidade	Concentração	Tipo de reator	Escala	Agitação rápida	Agitação lenta	Decantação	Tipo de efluente	Eficiência de remoção
MARCHAND (2014)	Cloreto férrico	6,0	130 mg CaCO <sub>3</sub> /L	76,9 mg FeCl <sub>3</sub> /L	Jar test.	1,5 L	1min 120rpm	19 min 20rpm	1h	Sanitário	87%
FREITAS, AMORIM JUNIOR (2018)	Cloreto férrico	6,0 - 6,5	-	200 mg FeCl <sub>3</sub> /L	Jar test	2 L	30s 350rpm	10 min 40 rpm	10 min	Sanitário	90%
RASÕES (2008)	Sulfato de alumínio	7,01	27 mg CaCO <sub>3</sub> /L	3,75 mg Al/L	Jar test	1 L	2 min 100 - 120 rpm	20 min 40 - 50 rpm	20 min	Água de barragem	90%
TIPPLE (2018)	policloreto de alumínio	6,5	-	0,045 mg/L a 0,45 mg/L de Al <sup>3+</sup>	Jar test	2 L	1 min 150 rpm	40 rpm	30 min	Industrial	96%
GUALBERTO (2009)	Cloreto férrico	7,2	174 mg CaCO <sub>3</sub> /L	80 mg FeCl <sub>3</sub> /L	Jar test	2 L	30 s 300 rpm	10 min 40 rpm	10 min	Sanitário	63,4%
SUZIN (2016)	Hidróxido de cálcio	9,0	428,5 mg CaCO <sub>3</sub> /L	4,6 ml Ca(OH) <sub>2</sub> 10% /L	Jar test	1 L	210 rpm	-	24h	Suinocultura	93,5%
MAHDI; QASIM (2019)	Hidróxido de cálcio	10,9	-	0,23 ml Ca(OH) <sub>2</sub> 95% / L	-	-	10 min 400 rpm	30 min 80 rpm	-	Artificial	99%
SUZIN <i>et al.</i> , (2013)	Hidróxido de cálcio	9	-	4,6 ml Ca(OH) <sub>2</sub> 10% /L	béquer	1 L	210 rpm	-	24h	Suinocultura	93%
FERNANDES <i>et al.</i> , (2008)	Hidróxido de cálcio	9	569 mg CaCO <sub>3</sub> /L	33 ml Ca(OH) <sub>2</sub> 2% / L	-	500 ml	300 rpm	-	30 min	Suinocultura	96%

Fonte: Do autor (2023).



Pode-se notar, a partir da Tabela 2, que os sais metálicos, assim como o hidróxido de cálcio, são agentes eficientes para remoção química de fósforo. Fernandes (2008) avaliou a remoção em diversos valores de pH, variando entre 8,5 e 10,5, e utilizando soluções estoque com concentrações diferentes de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Neste estudo, foi possível atingir remoções acima de 99% com um pH mais elevado. No entanto, ficou constatado pela autora que o pH ótimo é o de 9,0, pois, para elevar o pH além desse valor, é necessário a adição de maiores quantidades de solução estoque, o que seria em torno de 30% a mais, não justificando a diferença na eficiência de remoção de fósforo, que ficou entre 1% e 2%. A adição de solução para elevar o pH é um ponto crucial nos estudos com hidróxido de cálcio, pois reflete no custo de operação (FERNANDES, 2008).

Já no estudo de Mahdi e Qasim (2019), avaliou-se a precipitação do fósforo entre os pH 9,85 e 11,66. O autor concluiu que, para o material utilizado, o pH de melhor eficiência foi o de 10,9, pois, a partir dele, a remoção foi de praticamente 100%. Constata-se que uma rotação maior que 400 rpm na mistura rápida pode proporcionar a dissociação dos flóculos gerados, sendo crucial que a rotação não passe deste valor. Para valores acima de 5mg/ L de fósforo no efluente, a utilização de 0,23 ml/ L da solução de  $\text{Ca(OH)}_2$  95% não é eficiente, pois é necessário uma quantidade mais elevada de hidróxido de cálcio para que ocorra a precipitação (MAHDI; QASIM 2019).

Quanto ao estudo de Suzin (2016), foi constatado que o efluente que sai do reator biológico aerado apresentou eficiências de remoção de fósforo acima de 90%, ao utilizar solução de hidróxido de cálcio 10%. A alcalinidade e concentrações de  $\text{NH}_4^+$  interferem diretamente na remoção de fósforo por precipitação química utilizando o  $\text{Ca(OH)}_2$ , pois acontecerá a competição do carbono com o cálcio do  $\text{Ca(OH)}_2$ , para formação de  $\text{CaCO}_3$ , e da hidroxila, para formação de  $\text{NH}_3$ . Elevadas concentrações destes compostos podem prejudicar o sistema e ocasionar maior consumo da solução de hidróxido de cálcio, tornando o tratamento mais caro (SUZIN, 2016).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

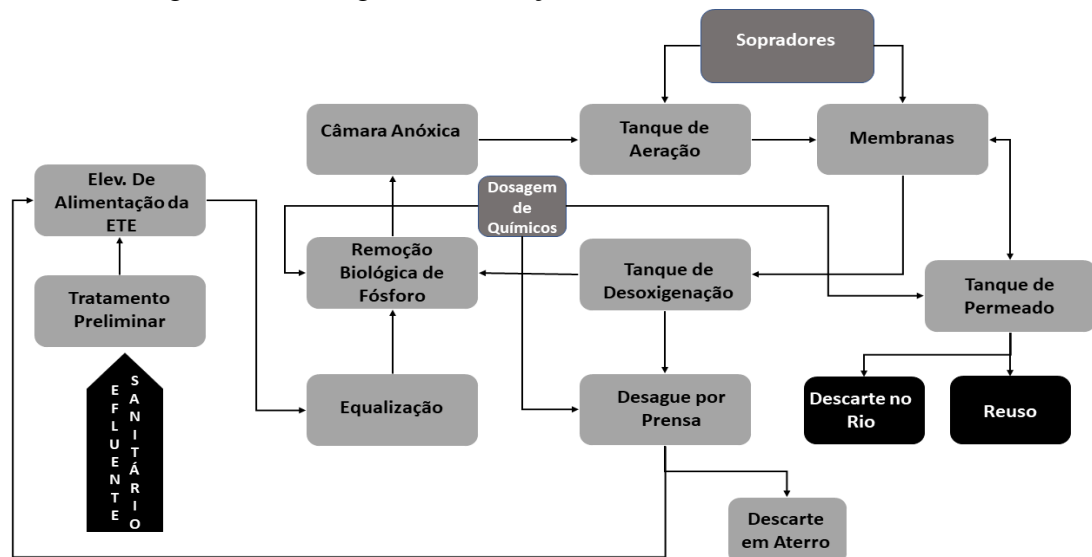
### 4.1 Caracterização da empresa

A empresa se encontra localizada na cidade de Paulínia, a sudoeste do Estado de São Paulo. A bacia hidrográfica que atende a região é a bacia do rio Paraná, sendo o rio Jaguari e o Atibaia os rios mais próximos. A empresa se caracteriza como uma indústria agroquímica e conta com diversos setores produtivos, de defensivos agrícolas, que variam entre inseticidas, herbicidas e fungicidas. O setor administrativo e de produção conta com a presença diária de mais de mil pessoas.

### 4.2 Caracterização da estação de tratamento

A estação de tratamento da empresa recebe todo efluente sanitário da indústria, incluindo efluente dos banheiros, vestiários e restaurantes. A vazão média mensal de entrada da estação é de 2300 m<sup>3</sup>/mês e a vazão média horária é de 3 m<sup>3</sup>/h. O fluxo de tratamento da estação pode ser compreendido na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma da estação de tratamento de efluentes.



Fonte: Do autor (2023).

O efluente, ao chegar na estação, passa por um tratamento preliminar para remoção de sólidos grosseiros, areia, e óleos e graxas. Após, o efluente segue para um tanque de equalização, para que se mantenha a vazão do fluxo do efluente e ocorra uma homogeneização

deste. Em seguida, o efluente segue para um sistema combinado entre tanque anaeróbio, câmara anóxica e tanque aerado. No tanque anaeróbio ocorre, principalmente, a remoção de fósforo. Já na câmara anóxica, a função principal é a remoção do nitrogênio amoniacal e nitrato. No tanque de aeração é onde ocorre a maior parte da decomposição da matéria orgânica. Após o tratamento combinado, o efluente é encaminhado para as membranas de ultrafiltração (0,04  $\mu\text{m}$ ), as quais têm a função de purificar ainda mais o efluente tratado, sendo capazes de reter microrganismos, óleos e materiais em suspensão.

O monitoramento do efluente bruto e tratado acontece com a frequência semanal, e as principais características do efluente tratado e eficiências de remoção da estação são descritas na Tabela 3, com base nos resultados analíticos de agosto de 2023.

Tabela 3 – Caracterização do efluente tratado e porcentagens de remoção da estação de tratamento de esgoto (médias e desvio padrão, entre parênteses).

Variável	Efluente bruto	Efluente tratado	Eficiência média de remoção
DBO (mg/L)	333 (250)	3 (0)	99,1%
DQO (mg/L)	1538 (1067)	17,75 (7,54)	98,8%
Nitrato (mg/L)	6,0 (2,1)	91,09 (21,49)	-
Nitrito (mg/L)	0,04 (0,01)	0,21 (0,11)	-
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	131,6 (9,7)	0,3 (0,29)	99,7%
Nitrogênio Kjeldahl (mg N/L)	154,1 (30,3)	1,01 (0,35)	99,3%
Nitrogênio total (mg/L)	158,1 (33,6)	97,51 (18,29)	38,3%
Óleos e graxas (mg/L)	107,6 (70,7)	20,15 (5,88)	81,2%
Turbidez (UNT)	293 (9,5)	0,43 (0,02)	99,8%
pH	7,8 (0,0)	7,83 (0,26)	-
Fósforo total	11,3 (4,1)	10,27 (1,65)	9,6%
Alcalinidade (CaCO <sub>3</sub> /L)	653 (135)	145 (15,27)	77,7%

Fonte: Do autor (2023).

Em caso de descarte no rio Atibaia, o efluente tratado deve atender a um limite de 0,03 mg/L de fósforo. Essa limitação foi definida pela CETESB, como um condicionante para a Licença de Operação da estação de tratamento de efluente.

### 4.3 Procedimento experimental

Para a realização do procedimento experimental de precipitação química de fósforo, utilizou-se o equipamento "jar-test" (Milan JTC). Inicialmente, transferiu-se um volume de 1 litro de efluente tratado para cada um dos jarros do equipamento. Em seguida, ajustou-se a rotação do sistema de agitação para cerca de 120 rpm (MARCHAND, 2014) e, imediatamente após o ajuste, procedeu-se à adição do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) a 10% (m/v), até atingir o pH desejado. Um medidor de pH (Digimed TH-48H) foi colocado em um dos copos para que a alteração do pH pudesse ser controlada simultaneamente à adição da solução, conforme a Figura 4.

Figura 4 – Demonstração do procedimento de controle de pH conforme adição de solução.



Fonte: Do autor (2023).

Para preparar a solução de hidróxido de cálcio, pesaram-se 10g de cal hidratado em uma balança de precisão (Ohaus PR Series). Em seguida, esse material foi adicionado a 100 ml de água destilada e a solução foi agitada com o auxílio de um agitador magnético (Fisaton 752A), até que a homogeneização fosse completa.

Para calcular a quantidade necessária de solução para elevar o pH para 9, utilizou-se o descrito por conceito de Metcalf e Eddy (2014), mencionado na seção 3.4 deste trabalho, que estabelece a necessidade de 1,4 a 1,5 vezes a alcalinidade do efluente expressa em  $\text{CaCO}_3$  para efetuar a elevação do pH. Assim, a quantidade de solução necessária foi determinada pela Equação 3:

$$V = \frac{(M * 1,5) * V1}{M1} \quad (3)$$

Onde V é o volume em ml da solução de 10% de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), M representa a massa de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presente em um litro de efluente tratado, V1 é o volume utilizado no preparo da solução, e M1 é a massa utilizada para preparar a solução.

As especificações do “jar-test” foram definidas com base nos estudos presentes na Tabela 2. Após 1 minuto de mistura rápida (MARCHAND, 2014), reduziu-se a rotação para 30 rpm, a partir de metodologia adaptada de Rasões (2008). Para que ocorresse a floculação, foi considerado um tempo de mistura lenta de 20 minutos (RASÕES, 2008). Após esse período, desligou-se o equipamento e permitiu-se a sedimentação dos flocos. O procedimento foi realizado em triplicata para valores de pH de 9,0, 10, 11 e 12.

O tempo de sedimentação teórico foi calculado através da Equação 4:

$$Ts = \frac{hs}{Vs} \quad (4)$$

Onde Ts representa o tempo de sedimentação, hs é a altura da lâmina da água no ponto de coleta de amostra no equipamento, e Vs é a velocidade de sedimentação.

Para encontrar o valor de Vs, adotou-se a taxa de aplicação superficial (TAS) de 1,7 cm/min, que é uma referência para decantadores de tratamento de água para abastecimento humano (ABNT, 1992) e, para o hs, foi definido um valor de 7cm da superfície da água ao ponto de coleta de amostras. Substituindo os valores de 1,7 cm/min e 7cm na Equação 4, obteve-se um tempo de sedimentação teórico de, aproximadamente, 4,1 minutos.

Um primeiro procedimento teste foi conduzido e observou-se que, mesmo após 4,1 minutos de sedimentação, ainda havia uma quantidade significativa de material em suspensão, bem como a decantação não ocorria de forma eficiente. Portanto, optou-se por adotar um tempo de sedimentação de 20 minutos para todas as repetições, conforme também adotado por Rasões (2008).

Após a execução do procedimento descrito, foram realizadas análises de pH, turbidez, fósforo e alcalinidade total nas amostras, antes e após os ensaios. Para a medição de valores de pH, utilizou-se o equipamento pHmetro (Digimed TH-48H), a turbidez foi mensurada por um turbidímetro (Hach DM-TU), pelo método Standard Methods 2130B (ABNT, 2017), fósforo total pelo método Hach 10209/10210 (HACH, 2015), ilustrado na Figura 5, com leitura em espectrofotômetro (Hach DR3900) e alcalinidade total conforme método Standard Methods 2320B (ABNT, 2017).

Figura 5 – Método Hach para determinação de fósforo total.



Fonte: Do autor (2023).

#### 4.4 Análise de dados e interpretação

Para realizar a análise de dados a partir dos resultados obtidos no procedimento descrito no tópico 4.3, foi utilizado o software RStudio. Primeiramente, realizou-se a criação de vetores, contendo os valores obtidos para o fósforo dos três jarros do "jar-test" em cada valor de pH: um vetor para os resultados do pH 9, outro para o pH 10, um terceiro para o pH 11 e o último para o pH 12.

Em seguida, foram calculadas a média e a variância entre esses valores. Para uma análise mais criteriosa, aplicou-se um teste de normalidade a cada vetor, utilizando o método de Shapiro-Wilk. Posteriormente, para comparar as médias dos valores de fósforo entre os diferentes níveis de pH, foi realizado o teste de Tukey.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 4 e 5, são apresentadas, respectivamente, a caracterização do efluente utilizado (água de reúso) e as características do efluente após o tratamento por precipitação química, com base na média dos resultados obtidos nas três repetições.

Tabela 4 – Caracterização do efluente de estudo (água de reúso) (valores médios).

Variáveis	Água de reúso
pH	7,55
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> / L)	143,33
Turbidez (NTU)	0,08
Fósforo (mg/L)	10,4

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 5 – Resultados analíticos após precipitação química com hidróxido de cálcio em diferentes valores de pH (valores médios e desvio padrão).

Variáveis	pH 9	pH 10	pH 11	pH 12
pH	9,01±0,07	10,02±0,02	11,05±0,05	12,08±0,02
Turbidez (NTU)	8,24±1,52	7,52 ±3,73	11,95 ±1,41	11,98 ±4,27
Fósforo (mg/L)	8,69±0,14 <sup>a</sup>	1,35±0,25 <sup>b</sup>	0,94±0,14 <sup>b</sup>	0,92±0,08 <sup>b</sup>

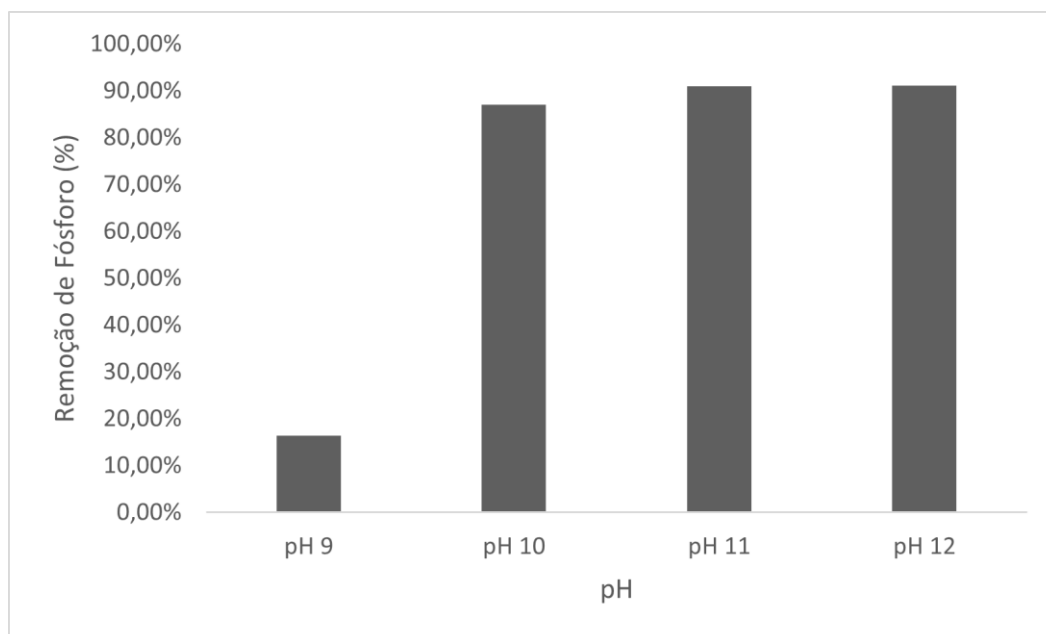
Nota: Com a significância de 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey, valores com a mesma letra na mesma linha não apresentaram diferença estatística.

Fonte: Do autor (2023).

De acordo com o experimento a quantidade de solução necessária para atingir os pH desejados (9, 10, 11 e 12) foram de 3ml, 3,9ml, 4,5ml e 6ml, sucessivamente. Ao calcular a quantidade de solução necessária para atingir o pH 9, conforme a Equação 3, constatou-se que seriam necessários 2 ml de solução, com base na alcalinidade média do efluente tratado, como indicado na Tabela 3. Entretanto, verificou-se que o volume de solução utilizado para alcançar o pH 9 foi de 3 ml. Isso pode ter ocorrido devido às reações que ocorrem com outros íons presentes no efluente, principalmente com a alcalinidade do efluente e a presença do íon amônio.

Analisando as Tabelas 4 e 5, é possível verificar a variação da eficiência de remoção de fósforo em relação à variação do pH. Essas informações estão apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Eficiência de remoção de fósforo para os diferentes valores de pH.



Fonte: Do autor (2023).

De acordo com a Figura 6, observa-se que a eficiência de remoção aumenta conforme o pH é elevado. Para o pH 9, a eficiência de remoção foi de 16%, o pH 10 obteve 87% de remoção, o pH 11 apresentou eficiência de remoção de 90% e o pH 12, 91%. A eficiência obtida com o pH 9 ficou consideravelmente abaixo do esperado, quando comparada a outros estudos, como o de Fernandes *et al.* (2008), Suzin *et al.* (2013), Mahdi e Qasim (2019) e Suzin (2016).

Para o pH 9, todos esses estudos que utilizaram hidróxido de cálcio como agente de precipitação química obtiveram eficiências de remoção acima de 90%. Um possível motivo para a baixa eficiência de remoção com o pH 9, pode ser o tempo de sedimentação. Suzin *et al.* (2013) empregou um tempo de sedimentação de 24 horas, enquanto Fernandes (2008) utilizou 30 minutos. Ambos os estudos consideraram o pH 9 como o mais eficaz, alcançando eficiências entre 93% e 96%.

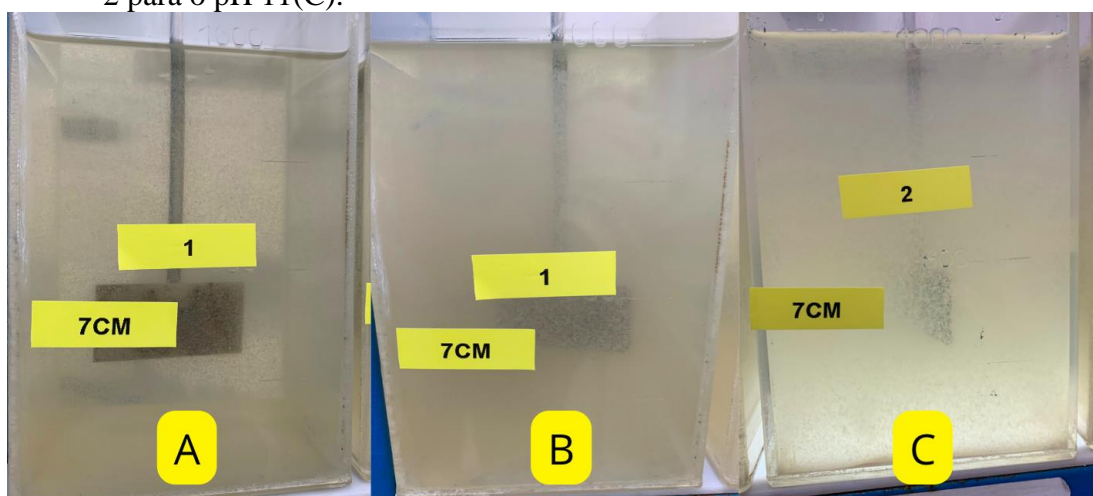
Foi possível observar também comparando as Tabelas 4 e 5, que além da redução dos valores de fósforo, ocorreu também um aumento nos valores de turbidez. A turbidez está diretamente associada à quantidade de partículas em suspensão no meio. Como o estudo envolveu a formação de flóculos por meio da adição de hidróxido de cálcio, é plausível que o aumento na turbidez esteja relacionado à presença dessas partículas ainda em suspensão durante a análise, fortalecendo o argumento de que é possível que o tempo de sedimentação foi insuficiente para permitir a completa sedimentação das partículas.

Durante o procedimento, observou-se que os flóculos formados nos ensaios utilizando



valores de pH entre 9 e 12 aumentaram em tamanho à medida que o pH aumentou, como pode ser observado na Figura 7. Paralelamente, a velocidade de sedimentação também aumentou, de acordo com o pH. Visualmente, a velocidade de sedimentação, devido aos tamanhos dos flóculos, foi significativamente mais rápida. Essas observações corroboram com a argumentação de que o tempo de sedimentação teve impacto na remoção de fósforo para o pH 9.

Figura 7 – Início do processo de decantação no jarro 1 para o pH 9 e pH 10 (A e B) e no jarro 2 para o pH 11(C).



Fonte: Do autor (2023).

Outro fator que potencialmente impactou na eficiência da remoção de fósforo em pH 9 pode ser a alcalinidade da água de reúso e a presença de íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ). Apesar de não indicar elevadas concentrações de íon amônio no efluente tratado, sua presença persiste, conforme demonstrado na Tabela 3. O  $\text{NH}_4^+$  neutraliza a hidroxila presente na solução de hidróxido de cálcio, formando  $\text{NH}_3$ . Por sua vez, a alcalinidade reage com a solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , resultando na formação de carbonato de cálcio. Considerando a presença simultânea desses compostos na água de reúso, pode-se supor que a relação da baixa eficiência está relacionada à competição por reações químicas entre eles e o fósforo.

Com exceção do pH 9, os resultados de remoção de fósforo, variando o pH, não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre si, após a aplicação do teste de Tukey. Esse teste compara os valores e retorna um resultado "lower". Caso esse valor seja negativo, significa que, estatisticamente, não há diferença significativa entre os resultados em comparação (MILLER, 1981). Essa discrepância na remoção de fósforo entre o pH 9 e os demais ficou evidente ao observar as amostras antes da leitura no espectrofotômetro. A olho

nu, pode-se notar que a amostra com pH 9 continha uma coloração mais intensa do que as demais amostras, as quais, por sinal, apresentaram colorações bem próximas, como demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – Visualização dos tubos com as amostras dos diferentes ensaios de precipitação química do efluente em estudo durante a realização da análise de fósforo.



Fonte: Do autor (2023).

Considerando não haver diferença estatística significativa entre os resultados, o valor de pH que apresentou o melhor resultado, foi o pH 10, com uma eficiência de remoção de quase 87%. Outro ponto relevante é que para atingir o pH 11 foi necessário a adição de 15% a mais de solução em comparação com o pH 10, como pode ser observado na Tabela 5, e a porcentagem de remoção cresceu em apenas 4%.

Para atingir o pH 12, foi necessária a adição de mais de 30% do volume de solução de hidróxido de cálcio em comparação ao pH 11. Entre os ensaios com pH 10 e o pH 12, ocorreu um aumento de 54% de solução de hidróxido de cálcio adicionada. Esses volumes adicionais não justificam as diferenças na eficiência de remoção entre os valores de pH. Uma situação semelhante foi observada no estudo de Fernandes (2008), que destacou que maiores quantidades de solução implicam em custos de tratamento mais elevados em escala real (FERNANDES *et al.*, 2008).

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados evidenciaram a eficácia da precipitação química de fósforo por meio da utilização de cal no tratamento do efluente sanitário de uma indústria agroquímica.

A elevação da turbidez no efluente tratado, após o processo químico, aponta a necessidade de estudos adicionais para mitigar esse efeito.

Apesar da remoção de fósforo superior a 87%, não foi possível alcançar o limite de lançamento estabelecido pela CETESB para o curso d'água, inviabilizando o reuso indireto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AENDA. **Mercado brasileiro de defensivos agrícolas no ano de 2019**. 2019. Disponível em: [https://www.aenda.org.br/noticia\\_imprensa/mercado-brasileiro-de-defensivos-agricolas-no-ano-de-2019/](https://www.aenda.org.br/noticia_imprensa/mercado-brasileiro-de-defensivos-agricolas-no-ano-de-2019/). Acesso em: 16 nov. 2023.

ANTÔNIO, Terezinha Damian. **Gestão ambiental industrial**. Palhoça: UnisulVirtual, 2011. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/21732/1/fulltext.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216**: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 18 p. Disponível em: [https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5609/nbr12216-projeto-de-estacao-de-tratamento-de-agua-para-abastecimento-publico-procedimento#:~:text=NBR12216%20DE%2004%2F1992&text=\\*Trata%2Dse%20de%20uma%20campanha,de%20produtos%20e%20servi%C3%A7os%20Target](https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5609/nbr12216-projeto-de-estacao-de-tratamento-de-agua-para-abastecimento-publico-procedimento#:~:text=NBR12216%20DE%2004%2F1992&text=*Trata%2Dse%20de%20uma%20campanha,de%20produtos%20e%20servi%C3%A7os%20Target). Acesso em: 16 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969**: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 60 p. Disponível em: <http://www.ipaam.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/NBR-13969-97-TS-Unid-trat-complem-e-disposi%C3%A7%C3%A3o-final.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025**: requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 22 p. Disponível em: [https://www.exactusmetrologia.com.br/sites/default/files/3-nbr\\_iso\\_iec\\_17025-2017\\_versao\\_exclusiva\\_treinamento.pdf](https://www.exactusmetrologia.com.br/sites/default/files/3-nbr_iso_iec_17025-2017_versao_exclusiva_treinamento.pdf). Acesso em: 16 nov. 2023.

BARRETO, Carolina. **Sustentabilidade industrial**: confira 6 medidas para preparar sua empresa. 2021. Useall. Disponível em: <https://www.useall.com.br/blog/post/sustentabilidade-industrial-confira-6-medidas-para-preparar-sua-empresa-97>. Acesso em: 16 nov. 2023.

BNDES. **A indústria dos defensivos agrícolas**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1513/1/A%20set.35\\_A%20ind%20c3%20de%20defensivos%20agr%20c3%20adcolas\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1513/1/A%20set.35_A%20ind%20c3%20de%20defensivos%20agr%20c3%20adcolas_P.pdf). Acesso em: 16 nov. 2023.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm). Acesso em: 16 nov. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. 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. Brasília, DF, 9 maio 2005. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/res-357-17032005.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Brasília, DF, 16 maio 2011. Disponível em: [https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA\\_n.430.2011.pdf](https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA_n.430.2011.pdf). Acesso em: 16 nov. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005**. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para prática de reúso de água não potável de água. Brasília, DF, 9 mar. 2006. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0054-281105.PDF>. Acesso em: 16 nov. 2023.

BRITO, Luiz Perereira *et al.* Mercado de reúso de água no Brasil: é possível assegurar um crescimento sem a definição de um arcabouço normativo e legal? **Revista DAE**, v. 59, p. 4-9, jan. 2012, p. 4-9, 2012.

CADONÁ, Eliana Aparecida *et al.* Contaminação por nitrogênio e fósforo de águas destinadas ao consumo humano em região com intensa atividade suinícola. **Geociências**, [s.l.], v. 37, n. 4, p. 883-891, 28 dez. 2018. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/12274/8749>. Acesso em: 16 nov. 2023.

CAFÉ POINT. **Crise hídrica: Agro e indústria devem reduzir consumo de água**. 2022. Disponível em: <https://www.cafepoint.com.br/noticias/giro-de-noticias/crise-hidrica-agro-e-industria-devem-reduzir-consumo-de-agua-228901/#>. Acesso em: 16 nov. 2023.

CALDA, Solange Alves Batista; SAMUDIO, Edgar Manuel Miranda. água de reúso para fins industriais estudo de caso. **Revista Brasil Para Todos**, [s.l.], v. 3, n. 2, dez. 2016. Disponível em: [https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais\\_Sem\\_Int\\_Etn\\_Racial/article/view/412](https://ojs.eniac.com.br/index.php/Anais_Sem_Int_Etn_Racial/article/view/412). Acesso em: 16 nov. 2023.

CETESB. **Reúso de água**. 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/tpos-de-agua/reuso-de-agua/>. Acesso em: 16 nov. 2023.

CHAVES, D. T.; FINZER, J. R. D. Determinação de tamanho de partícula de resíduos e separação por filtração na produção de herbicidas. In: ENCONTRO DE DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AGROINDUSTRIAIS, 2., 2018, Uberaba. **Anais [...]**, 2018. p. 1-9. Disponível em: <https://repositorio.uniube.br/bitstream/123456789/906/1/DETERMINA%20DE%20TAMANHO%20DE%20PART%20DE%20RES%20DDUOS%20SEPARA%20POR%20FILTRA%20NA%20PRODU%20DE%20HERBICIDAS.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Indústria Sustentável**. Brasília: CNI, 2023. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/cni/canais/industria-sustentavel/>.

Acesso em: 16 nov. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Uso da água no setor industrial Brasileiro:** matriz de coeficientes técnicos. Brasília: CNI, 2013. Disponível em: <https://www.imasul.ms.gov.br/wp-content/uploads/2017/12/Uso-de-%C3%81gua-no-Setor-Industrial-Brasileiro.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2023.

COSTA, Carolina Domingues Alves; OLIVEIRA, Letícia Alves dos Anjos; LIMA, Natália Alessandra Fernandes de. **Reúso da água nas indústrias alimentícias:** uma proposta de consumo consciente. 2014. 73 f. TCC (Graduação em Administração) – Centro Universitário Eurípides de Marília (Univem), Marília, 2014. Disponível em: <https://aberto.univem.edu.br/bitstream/handle/11077/1145/TRABALHO%20DE%20CURSO%202014%20-%20REUSO%20DE%20%C3%81GUA%20NAS%20INDUSTRIAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 nov. 2023.

COSTA FILHO, D. V. et al. Aproveitamento de resíduos agroindustriais na elaboração de subprodutos. In: **II Congresso Internacional das Ciências Agrárias COINTER-PDVAgro 2017**. ISSN: 2526-7701. Oral. João Pessoa: Pernambuco, 2017, p. 1–8, 2017.

DONAIRE, D. **Gestão ambiental na empresa**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

FERNANDES, Gabriela Wendler *et al.* Chemical phosphorus removal: a clean strategy for piggery wastewater management in brazil. **Environmental Technology**, [s.l.], v. 33, n. 14, p. 1677-1683, jul. 2012. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/ARSTUserFiles/60820000/manuscripts/2012/man887.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2023.

FERNANDES, Gabriela Wendler. Avaliação de processos para remoção química de fósforo de efluente de suinocultura. 2008. 82 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/10418/GABRIELAFERNANDES.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 nov. 2023.

FREITAS, Paloma Caetano; AMORIM JÚNIOR, Joãosito Cabral. Avaliação da eficiência na remoção de fósforo da estação de tratamento de esgoto doméstico por processos de precipitação química. **Revista Espaço Acadêmico**, [s.l.], v. 5, n. 1, 2018. Disponível em: <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2018/07/revista-espaco-academico-v05-n01-artigo-01.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2023.

FUKASAWA, Bruno Nogueira; MIERZWA, José Carlos. Modelo de suporte à decisão para implantação de programas de reúso não potável como ferramenta de planejamento. **Brazilian Journal Of Development**, [s.l.], v. 6, n. 3, p. 14604-14641, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/7988/7257>. Acesso em: 16 nov. 2023.

GOMES, Natália Barabani Leal *et al.* Proposta de reúso da água utilizada no pré-preparo de hortifrutigranjeiros e na higienização de pratos e talheres em um restaurante universitário no Estado do Rio de Janeiro. **Demetra: Alimentação, Nutrição & Saúde**, [s.l.], v. 15, p. 1-11, 28 maio 2020. Disponível em: <https://www.e->

publicacoes.uerj.br/demetra/article/view/37978/33841. Acesso em: 16 nov. 2023.

GUALBERTO, Fernanda Ferrari. **Otimização de processo de precipitação química na remoção de fósforo de esgotos sanitários mediante a utilização de sais de ferro como coagulante**. 2009. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-20072009-150538/publico/FernandaGualberto\\_R1.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-20072009-150538/publico/FernandaGualberto_R1.pdf). Acesso em: 16 nov. 2023.

HACH. Spectrophotometric Measurement of Phosphorus in Water and Wastewater. 2015. Disponível em: <https://images.hach.com/asset-get.download.jsa?code=242567>. Acesso em: 16 nov. 2023.

LAMMEL, João Sereno. A importância da indústria agroquímica para o agronegócio brasileiro. **Revista Facto**, [s.l.], v. 56, n. 2, abr./jun. 2018. Disponível em: <https://abifina.org.br/facto/56/artigos/a-importancia-da-industria-agroquimica-para-o-agronegocio-brasileiro/>. Acesso em: 16 nov. 2023.

LAMMEL, João Sereno. Panorama e perspectivas da indústria agroquímica diante do novo governo. **Revista Facto**, [s.l.], v. 58, n. 4, out./dez. 2018. Disponível em: <https://abifina.org.br/facto/58/artigos/panorama-e-perspectivas-da-industria-agroquimica-diante-do-novo-governo/>. Acesso em: 16 nov. 2023.

LANA, Évellen Karoline Ramos de; CASIMIRO, Luís Fernando Calheiros. O uso de defensivos agrícolas e o direito à alimentação: De que modo aplicação dos defensivos agrícolas impacta na produção de alimentos? **Revista Nativa Americana de Ciências, Tecnologia & Inovação**, [s.l.], v. 3, n. 2, 2022. Disponível em: <https://periodicos.saolucasjiparana.edu.br/riacti/article/view/642/586>. Acesso em: 16 nov. 2023.

LEAL, José Guilherme Tollstadius. Reflexão sobre a importância da produção nacional de insumos para a agricultura brasileira. **Revista Facto**, [s.l.], v. 65, n. 1, jan./abr. 2021. Disponível em: <https://abifina.org.br/facto/65/artigos/reflexao-sobre-a-importancia-da-producao-nacional-de-insumos-para-a-agricultura-brasileira/>. Acesso em: 16 nov. 2023.

LEGNER, Carla. **Qualidade da água usada na indústria química**. 2021. Meio Filtrante. Disponível em: <https://www.meiofiltrante.com.br/Artigo/4902/qualidade-da-agua-usada-na-industria-quimica>. Acesso em: 16 nov. 2023.

LIGNANI, Leonardo de Bem; BRANDÃO, Júlia Lima Gorges. A ditadura dos agrotóxicos: o programa nacional de defensivos agrícolas e as mudanças na produção e no consumo de pesticidas no Brasil, 1975-1985. **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, [s.l.], v. 29, n. 2, p. 337-359, jun. 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hcsm/a/5H6kY84N7SqzwwrLps45gPw/?lang=pt#>. Acesso em: 16 nov. 2023.

MACEDO, João Marcelo Alves *et al.* Contabilidade ambiental e sustentabilidade: um estudo nas empresas do ramo de fertilizantes e defensivos agrícolas, listadas na Bovespa nos anos de 2005-2009. In: CSEAR SOUTH AMERICA, 2, 2011, Ribeirão Preto. **Anais [...]**, 2011, p. 1-18. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Thaiseany-Rego>

2/publication/279287957\_Contabilidade\_ambiental\_e\_sustentabilidade\_um\_estudo\_nas\_empresas\_do\_ramo\_de\_fertilizantes\_e\_defensivos\_agricolas\_listadas\_na\_BOVESPA\_nos\_anos\_de\_2005-2009/links/5591745608ae47a34910a6b0/Contabilidade-ambiental-e-sustentabilidade-um-estudo-nas-empresas-do-ramo-de-fertilizantes-e-defensivos-agricolas-listadas-na-BOVESPA-nos-anos-de-2005-2009.pdf. Acesso em: 16 nov. 2023.

MAHDI, Shams Asem; QASIM, Raghad Fareed. Kinetic Study of the Recovery of Phosphorus from Wastewater by Calcium Hydroxide Solution. **Journal Of Engineering**, [s.l.], v. 25, n. 6, p. 19-29, 31 maio 2019. Disponível em: <https://joe.uobaghdad.edu.iq/index.php/main/article/view/j.eng.2019.06.02/618>. Acesso em: 16 nov. 2023.

MARCHAND, Blanca Isabel Villafranca. **Remoção química e biológica de fósforo de esgoto sanitário em reator em bateladas sequenciais**. 2014. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/194028/PGEA0527-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 nov. 2023.

MIERZWA, José Carlos; HESPANHOL, Ivanildo. **Água na indústria: uso racional e reúso**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MILLER, Rupert G. **Simultaneous Statistical Inference**. 2nd. ed. New York: Springer-Verlag, 1981.

MONITOR MERCANTIL. **Brasil só utiliza menos de 1% de água de reúso**. 2021. Disponível em: <https://monitormercantil.com.br/brasil-so-utiliza-menos-de-1-de-agua-de-reuso/#:~:text=At%C3%A9%202030%20uso%20de%20%C3%A1gua,recurso%20%C3%A9%20oriunda%20de%20reaproveitamento>. Acesso em: 16 nov. 2023.

MORAES, Danielle Serra de Lima; JORDÃO, Berenice Quinzani. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. **Revista de Saúde Pública**, [s.l.], v. 36, n. 3, p. 370-374, jun. 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rsp/a/qNPRVprxpJZq9bpRkMwRTYC/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 16 nov. 2023.

MOTA, Francisco Suetônico Bastos; VON SPERLING, Marcos (Orgs). **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. Disponível em: [http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5\\_tema\\_2.pdf](http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5_tema_2.pdf). Acesso em: 16 nov. 2023.

MOURA, Priscila Gonçalves *et al.* Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 25, n. 6, p. 791-808, dez. 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/7888VSVHBqZK7Bnz85X5Z8x/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 16 nov. 2023.

ONU NEWS. **46% da população global vive sem acesso a saneamento básico**. 2023. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2023/03/1811712>. Acesso em: 16 nov. 2023.

RASÕES, Marília Alexandra Almeida. **Estudo sobre a precipitação química de fósforo como forma de remediação do Estado Trófico da Lagoa das Furnas, S. Miguel – Açores**. 2008. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e



Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/303708851.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2023.

ROYSTON, J. P. An Extension of Shapiro and Wilk's W Test for Normality to Large Samples. **Applied Statistics**, [s.l.], v. 31, n. 2, p. 115, 1982. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2347973>. Acesso em: 16 nov. 2023.

RUBIM, Cristiane. Remoção de nutrientes em esgotos evita descontrole que causa danos. **Revista TAE**, Santo André, v. 34, dez./jan. 2017. Disponível em: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/25/remocao-de-nutrientes-em-esgotos-evita-descontrole-que-causa-danos>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Decreto nº 8.468, de 08 de setembro de 1976**. Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. São Paulo, SP, 8 set. 1976. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/1976/09/dec-8468.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução conjunta SES/SMA/SSRH nº 01 de 28 de junho de 2017**. Disciplina o reúso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário e dá providências correlatas. São Paulo, SP, 29 jun. 2017.

SILVA, Guilherme Heinzen; MARTINS, Cláudia Lavina. **Avaliação do processo de remoção biológica de fósforo, com diferentes condições operacionais, utilizando ensaios respirométricos e de biodesfosfatação em bancada**. 2016. TCC (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: [https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/166852/Artigo-TCC\\_Guilherme\\_Heinzen\\_Silva\\_VFINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=A%20remo%C3%A7%C3%A3o%20biol%C3%B3gica%20de%20f%C3%B3sforo,%C3%A9%20absorvido%20por%20estes%20microrganismos](https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/166852/Artigo-TCC_Guilherme_Heinzen_Silva_VFINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=A%20remo%C3%A7%C3%A3o%20biol%C3%B3gica%20de%20f%C3%B3sforo,%C3%A9%20absorvido%20por%20estes%20microrganismos). Acesso em: 16 nov. 2023.

SUZIN, Lidimara *et al.* Remoção de fósforo em efluentes da suinocultura por precipitação química com adição de compostos de cálcio e sódio. In: SIMPÓSIO SUL DA GESTÃO E CONSERVAÇÃO AMBIENTAL, 7., 2013, Erechim. **Anais [...]**, 2013, p. 1-5. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/90898/1/final7244.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SUZIN, Lidimara. Remoção química de fósforo de efluente suinícola: implicações da qualidade do efluente sobre a eficiência do processo. 2016. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016. Disponível em: [https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/3078/2/Lidimara\\_Suzin2016.pdf](https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/3078/2/Lidimara_Suzin2016.pdf). Acesso em: 16 nov. 2023.

TIPPLE, Jimmy Motta. **Avaliação da precipitação química na remoção de fósforo do efluente de uma indústria de refrigerante**. 2018. TCC (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018. Disponível em: [https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/AVALIA%C3%87%C3%83O\\_DA\\_PRECIPITA%C3%87%C3%83O\\_QU%C3%8DMICA\\_NA\\_REMO%C3%87%C3%83O\\_DE\\_F%C3%93SFORO\\_DO\\_EFLUENTE\\_DE\\_UMA\\_IND%C3%9ASTRIA\\_DE\\_REFRIGERANTE.pdf](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/AVALIA%C3%87%C3%83O_DA_PRECIPITA%C3%87%C3%83O_QU%C3%8DMICA_NA_REMO%C3%87%C3%83O_DE_F%C3%93SFORO_DO_EFLUENTE_DE_UMA_IND%C3%9ASTRIA_DE_REFRIGERANTE.pdf).

Acesso em: 16 nov. 2023.

TWARDOKUS, Rolf Guenter. **Reúso da água no processo de tingimento da indústria têxtil**. 2004. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88051/212455.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 nov. 2023.

WANG, Dong-Bo. *et al.* Biological Phosphorus removal in sequencing batch reactor with single-stage oxic process. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 99, n. 13, p. 5466-5473, set. 2008.

YANG, Kai *et al.* Municipal wastewater phosphorus removal by coagulation. **Environmental Technology**, [s.l.], v. 31, n. 6, p. 601-609, maio 2010. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09593330903573223>. Acesso em: 16 nov. 2023.