



**Ministério da Educação**  
**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**Escola de Minas**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental**



Dissertação de Mestrado

**Aplicação, aumento de escala e avaliação da viabilidade técnica e econômica da tecnologia bioadsorvente de arsênio preparada a partir do bagaço de cana-de-açúcar**

**Jorge Eduardo Garcia Ferreira Junior**

Ouro Preto – MG  
Setembro de 2022



Ministério da Educação  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental**



Dissertação de Mestrado

**Aplicação, aumento de escala e avaliação da viabilidade técnica e econômica da tecnologia bioadsorvente de arsênio preparada a partir do bagaço de cana-de-açúcar**

Aluno: Jorge Eduardo Garcia Ferreira Junior

Orientador: Dr. Leandro Vinícius Alves Gurgel

Coorientadora: Dra. Liliane Catone Soares

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de concentração:  
Tecnologias Ambientais.

Ouro Preto – MG  
Setembro de 2022

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F383a Ferreira Junior, Jorge Eduardo Garcia.

Aplicação, aumento de escala e avaliação da viabilidade técnica e econômica da tecnologia bioadsorvente de arsênio preparada a partir do bagaço de cana-de-açúcar. [manuscrito] / Jorge Eduardo Garcia Ferreira Junior. - 2022.

158 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Leandro Vinícius Alves Gurgel.

Coorientadora: Profa. Dra. Liliane Catone Soares.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Tecnologias Ambientais.

1. Arsênio. 2. Biomassa - Bioadsorvente. 3. Equações diferenciais lineares - Escalonamento. 4. Análise econômico-financeira. I. Gurgel, Leandro Vinícius Alves. II. Soares, Liliane Catone. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 502:004

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Jorge Eduardo Garcia Ferreira Junior**

**Aplicação, aumento de escala e avaliação da viabilidade técnica e econômica da tecnologia bioadsorvente de arsênio preparada a partir do bagaço de cana-de-açúcar**

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de mestre

Aprovada em 29 de setembro de 2022

### Membros da banca

Prof. Dr. Leandro Vinícius Alves Gurgel - Orientador Universidade Federal de Ouro Preto  
Profa. Dra. Liliane Catone Soares - Co-orientadora Universidade Federal de Ouro Preto  
Prof. Dr. Marcelo Gomes Speziali - Universidade Federal de Ouro Preto  
Prof. Dr. Héctor Javier Luna Wandurraga - CTO Intellecto análises técnicas e serviços de engenharia

Prof. Dr. Leandro Vinícius Alves Gurgel, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 16/12/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Vinicius Alves Gurgel, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2022, às 12:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0442008** e o código CRC **024003EF**.

Dedico este trabalho à minha avó Deolinda (*in memoriam*) e à minha mãe Mariana, que tanto contribuíram com meu crescimento pessoal.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me acompanhar e proteger durante os maiores desafios da minha vida e por me mostrar que a fé é um atributo insubstituível à existência humana.

À minha mãe Mariana pelo amor e dedicação, por me incentivar nos estudos e pelo apoio nas mais diversas escolhas da minha vida e ao meu pai Jorge por sempre acreditar nas minhas escolhas. Ao meu irmão Leonardo por me fazer acreditar que devo sempre continuar buscando meus sonhos, você é uma inspiração para mim.

Aos meus demais familiares que sempre me apoiaram e me incentivaram.

À minha companheira de vida, Ana Carolina, pelo amor, pela compreensão, por sempre me ouvir e me incentivar, esta caminhada ficou mais leve ao seu lado.

Ao prof. Leandro Gurgel pela orientação no mestrado, pelos ensinamentos, pela dedicação, pelo compartilhamento de experiências e por me oportunizar o ingresso na ciência. Muito obrigado por me incentivar, desde o início, a buscar uma contribuição social por meio da pesquisa.

À minha coorientadora, profa. Liliane Catone, por acompanhar e contribuir efetivamente com todo o trabalho realizado durante o mestrado.

Aos professores Marcelo Speziali e Rochel Lago do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG pela oportunidade de participar da disciplina isolada “Escalonamento de Tecnologias” e pelo conhecimento adquirido durante as aulas.

À Pró-reitora da PRACE, Natália Lisbôa, por autorizar minha jornada especial de servidor estudante, obrigado pela oportunidade de crescimento profissional.

Aos colegas do GFQO pela colaboração e amizade. Agradeço em especial à Luisa Maia por acreditar na sinergia entre os nossos trabalhos, por compartilhar comigo as conquistas e as dificuldades da pesquisa, pelos ensinamentos no laboratório e pela amizade.

Às equipes formadas para o Programa Ideiaz e o Projeto Interinstitucional. À Grazielle Rocha pela colaboração com a escrita e execução do Projeto Interinstitucional.

À Natália Tanure pelas análises realizadas no FTIR. À técnica do DEGEO, Adriana Abreu, pelas análises de ICP-OES. Ao prof. Bruno Baêta e Mariana Alves pelas análises de cromatografia de íons. A todos os colegas do ProAmb pela parceria e amizade.

Ao analista de investimentos da FUNDEPAR e colega de turma na UFMG, Matheus Azzi, pelo suporte na análise financeira do modelo de negócio.

Ao meu amigo Pedro Farias por me apoiar durante a pesquisa, por contribuir com sua experiência acadêmica e por ser um exemplo de pesquisador para mim.

Aos meus amigos Gabriel Leitão e Bernardo Gouveia por compartilharem suas experiências em projetos de tratamento de água e efluente. Ao meu amigo Lucas Caseira pelas intermináveis conversas sobre a Nova Economia.

Aos meus amigos de Ouro Preto, Reginaldo, Darlan, Caio Assis, Ilton, João Marcos, Lucas, Allan, Samuel, Pedro, Felipe, Acácio, Rener, Jefferson, Juan, Caio Massara, Guilherme, Augusto e John pela amizade e apoio.

Às pessoas que não foram mencionadas e que, de alguma forma, contribuíram com este trabalho.

À aceleradora GROW<sup>+</sup> pelas atividades de inovação do Programa Ideiaz.

À ONG Full Belly Brasil pela doação do filtro TWP e pelo apoio no projeto Interinstitucional.

À Celta Brasil pela doação do quartzo revestido com óxido de manganês.

À UFG pela participação na 8ª Olimpíada de Empreendedorismo Universitário.

Ao Ministério Público do Trabalho (MPT) pelo financiamento do Projeto Interinstitucional (SEI UFOP - Processo N° 23109.004010/2021-44).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Processo N° 307445/2019-4).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

“O destino vai atrás de quem vai atrás do destino.”

*José Saramago*



## RESUMO

O arsênio é um elemento tóxico presente em fontes de água superficial, subterrânea e efluentes industriais que pode ser removido pelo bioadsorvente de ânions (BAA) desenvolvido pelo Grupo de Físico-Química Orgânica (GFQO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e preparado a partir do bagaço de cana-de-açúcar. A produção do BAA foi realizada a partir da modificação química do bagaço de cana, um resíduo da indústria sucroalcooleira, largamente produzido no Brasil. O desenvolvimento de tecnologias a partir de subprodutos industriais contribui com o surgimento de produtos sustentáveis com elevado valor agregado para o mercado. Testes em laboratório comprovaram o desempenho satisfatório do BAA para a remoção de arsênio em meio aquoso, o que permitiu a validação das características críticas, classificando a tecnologia no nível de maturidade tecnológica 4 (TRL 4). Foram identificadas duas demandas para a aplicação do BAA: *i*) tratamento de efluente contaminado por arsênio gerado por mineradoras de ouro; *ii*) tratamento de água subterrânea contaminada por arsênio utilizada como fonte alternativa de abastecimento pela população de Ouro Preto, Minas Gerais. Os testes realizados em modo contínuo mostraram que o BAA é uma opção de base renovável satisfatória, sendo necessária a remoção dos ânions interferentes, antes da aplicação da tecnologia para remoção de arsênio. O desempenho do BAA foi similar ao da alumina ativada, demonstrando que a eficiência de remoção de arsênio pelo BAA alcançou níveis suficientes para competir com outras tecnologias no mercado. O processo de obtenção do BAA foi mapeado e otimizado, possibilitando a remoção da etapa de extração em Soxhlet e a recuperação de solventes nas etapas de lavagem. Foram identificadas as possíveis rotas de produção verde e o controle de cada produto químico empregado na produção do BAA. O aumento de escala do processo produtivo do BAA foi realizado em reator de aço inoxidável 304, com produção de 49,3 g do material. O adsorvente apresentou ganho de massa e capacidade de adsorção de 20,5 % e  $19 \pm 2 \text{ mg g}^{-1}$ , respectivamente. Além disso, o espectro na região do infravermelho e o teor de N (1,22 %) sugerem que a modificação química ocorreu com sucesso, sendo necessários ajustes operacionais para o alcance dos parâmetros de referência. A análise econômico-financeira do modelo de negócio inicial com aumento de produção gradativo ao longo de cinco anos, considerando a planta piloto do GFQO e o mercado potencial para os dispositivos acopláveis aos filtros de barro, obteve valor presente líquido de R\$ 269.654,59, considerando uma taxa mínima de atratividade de 20 %, taxa interna de retorno de 28 %, *payback* de 3,0 anos, *payback* descontado de 3,4 anos e ponto de equilíbrio de 1,6 ano.

**Palavras-chave:** arsênio, bioadsorvente, escalonamento, análise econômico-financeira.

## ABSTRACT

Arsenic is a toxic element present in surface and ground water and industrial effluents that can be removed by the biosorbent of anions (BAA), developed by the Group of Physical Organic Chemistry (GFQO) from the Federal University of Ouro Preto (UFOP) and prepared from sugarcane bagasse. BAA was produced by chemical modification of sugarcane bagasse, a residue from the sugar-alcohol industry, largely produced in Brazil. The development of technologies from industrial by-products contributes to the emergence of sustainable products with high added-value for the market. Laboratory tests proved the satisfactory performance of BAA for the removal of arsenic from aqueous solution, which allowed the validation of critical characteristics, classifying the technology at Technology Readiness Level 4 (TRL 4). Two demands were identified for the application of BAA: *i*) treatment of effluent contaminated with arsenic generated by gold mining companies; *ii*) treatment of groundwater contaminated with arsenic used as an alternative source of water supply by the population of Ouro Preto city, Minas Gerais. The tests showed that BAA is a suitable renewable-base option to be applied in continuous mode, requiring the removal of interfering anions, before applying the technology for arsenic removal. The performance of BAA was similar to that showed by activated alumina, demonstrating that BAA reached an efficiency of arsenic removal able to compete with other technologies on the market. The process of BAA production was mapped and optimized, allowing the removal of the Soxhlet extraction step and the recovery of solvents in the washing steps. Possible green production routes, control, and inspection were identified for the chemical reagents used to produce BAA. The scale-up of the BAA production process was carried out in a 304 stainless steel reactor, with a production of 49.3 g of material. BAA showed a weight gain and an adsorption capacity of  $20.5 \pm 19 \pm 2 \text{ mg g}^{-1}$ , respectively. In addition, the infrared spectrum and the N content (1.22 %) of BAA suggested that the chemical modification was successful accomplished, requiring operational adjustments to reach the reference parameters. The financial performance of the initial business model, with a gradual increase in production over five years, considering the GFQO pilot plant and the potential market for devices attachable to clay filters, obtained net present value of USD 51,955.95 (1 USD = 5,19 BRL), considering a weighted average capital cost of 20%, internal rate of return of 28 %, payback of 3.0 years, discounted payback of 3.4 years, and breakeven point of 1.6 years.

**Keywords:** arsenic, bioadsorbent, scale-up, techno-economic feasibility.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeitos da exposição ao arsênio em plantas, seres humanos e animais .....	23
Figura 2 – Etapas envolvidas na adsorção em adsorventes porosos.....	32
Figura 3 – Representação estrutural celular da cana-de-açúcar .....	35
Figura 4 – Representação da plataforma tecnológica do GFQO desenvolvida a partir da modificação química do bagaço cana-de-açúcar com diferentes reagentes .....	38
Figura 5 – Modelo de produção circular .....	42
Figura 6 – Nível de Prontidão Tecnológica ( <i>Technology Readiness Level</i> ).....	43
Figura 7 – TRL e o desenvolvimento tecnológico na Indústria Química.....	44
Figura 8 – Etapas do escalonamento tecnológico.....	45
Figura 9 – Canvas de Validação de Hipóteses para aplicação do bioadsorvente .....	68
Figura 10 – Sistema piloto para teste de adsorção em modo contínuo.....	71
Figura 11 – Gráfico do estudo de adsorção em coluna de leito fixo .....	74
Figura 12 – Gráfico das respostas à pesquisa sobre os sistemas de filtração utilizados em Ouro Preto .....	79
Figura 13 – Dispositivo D1 acoplável ao filtro de barro .....	80
Figura 14 – Gráfico da concentração de ânions na água natural e tratada pelo dispositivo D1 .....	81
Figura 15 – Dispositivo complementar D2 .....	82
Figura 16 – Dispositivo complementar D3 .....	82
Figura 17 - Fluxograma do processo de produção do bioadsorvente em laboratório.....	86
Figura 18 – Espectro de UV-Vis após a remoção da etapa de extração em Soxhlet do pré-tratamento .....	90
Figura 19 – Fluxograma do processo produtivo otimizado do bioadsorvente .....	91
Figura 20 – Balanço de massa da atividade de pré-tratamento .....	98
Figura 21 – Gráfico da distribuição granulométrica do bagaço de cana-de-açúcar .....	99
Figura 22 – Balanço de massa da atividade de síntese do bioadsorvente.....	100
Figura 23 – Reator de aço inoxidável 304 utilizado no aumento de escala do bioadsorvente .....	101
Figura 24 – Gráfico da temperatura do reator na produção do bioadsorvente .....	102
Figura 25 – Espectro no infravermelho (FTIR) do bioadsorvente .....	103
Figura 26 – Fases do efluente gerado após a etapa de modificação química .....	107
Figura 27 – Espectro no infravermelho (FTIR) da fração viscosa alaranjada e da fração amarelada.....	107

Figura 28 – Espectro no infravermelho (FTIR) da fração viscosa alaranjada e da N,N-dimetilformamida .....	108
Figura 29 – Espectro no infravermelho (FTIR) da fração amarelada e da N,N-dimetilformamida .....	108
Figura 30 – Proposta de estrutura para o surfactante gemini formado durante a modificação química do bagaço de cana com epicloridrina e trietilamina (provavelmente corresponde a fração viscosa alaranjada) .....	110
Figura 31 – Proposta de estrutura do surfactante a base de hemiceluloses (cadeias de xilana) formado durante a modificação química do bagaço de cana com epicloridrina e trietilamina (provavelmente corresponde a fração amarelada) (R = H ou unidade de epicloridrina ligada a trietilamina) .....	110
Figura 32 – Gráfico da geração de caixa do modelo de negócio.....	119
Figura 33 – Gráfico do Valor Presente líquido (VPL) do modelo de negócio.....	119
Figura 34 – Gráfico da evolução das receitas e custos do modelo de negócio.....	120

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de síntese dos bioadsorventes do GFQO .....	39
Tabela 2 – Diferenças entre patente e segredo de negócio.....	51
Tabela 3 – Parâmetros dos testes em modo contínuo em coluna de leito fixo .....	71
Tabela 4 – Parâmetros do estudo de adsorção de arsênio em materiais comerciais e BAA em batelada.....	78
Tabela 5 – Parâmetros da cinética de adsorção de arsênio em BAA com amostra de água natural .....	78
Tabela 6 – Análise preliminar de custo dos produtos químicos .....	88
Tabela 7 – Análise de custo dos produtos químicos do processo otimizado.....	93
Tabela 8 – Caracterização dos lotes produzidos para validação do processo .....	94
Tabela 9 – Caracterização do lote produzido no reator de aço inoxidável 304.....	103
Tabela 10 - Descrição das bandas dos espectros FTIR do BAA e BAA-R.....	104
Tabela 11 – Análise de custo do bioadsorvente produzido na planta piloto .....	106
Tabela 12 – Descrição das bandas dos espectros de FTIR do efluente .....	109
Tabela 13 – Considerações para avaliação da viabilidade do modelo de negócio .....	111
Tabela 14 – Custo dos componentes para montagem do MVP.....	112
Tabela 15 – Investimento em bens de capital para montagem da planta piloto .....	112
Tabela 16 – Custo mensal de energia da planta piloto .....	113
Tabela 17 – Distribuição anual da mão de obra por função .....	114
Tabela 18 – Valor unitário dos itens da estrutura de custos do modelo de negócio.....	114
Tabela 19 – Custos variáveis do modelo de negócio.....	115
Tabela 20 – Precificação pelo índice multiplicador ( <i>markup</i> ) .....	116
Tabela 21 – Fluxo de caixa esperado para o modelo de negócio .....	117
Tabela 22 – Indicadores financeiros do modelo de negócio .....	118

## LISTA DE SIGLAS

ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química;
BAA	Bagaço Adsorvente de Ânions;
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i> (gastos com bens de capital);
$C_e$	Concentração no equilíbrio;
$C_i$	Concentração inicial;
$C_t$	Concentração da amostra no tempo de coleta;
FIS PQ	Ficha de Informação de Segurança para Produtos Químicos;
FORTEC	Fórum Nacional de Gestores de Inovação e Transferência de Tecnologia;
FTIR	Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier;
GFQO	Grupo de Físico-Química Orgânica;
ICP-MS	Espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado;
ICT	Instituto de Ciência e Tecnologia;
IGI	Índice Global de Inovação;
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial;
MVP	<i>Minimum Viable Product</i> (Produto Mínimo Viável);
NIT	Núcleo de Inovação Tecnológica;
NSF	<i>National Science Foundation</i> (Fundação Nacional de Ciência dos EUA);
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável;
OMPI	Organização Mundial da Propriedade Intelectual;
OPEX	<i>Operational Expenditure</i> (gastos operacionais);
PCT	Tratado de Cooperação de Patentes;
$\text{pH}_{\text{pcz}}$	pH do ponto de carga zero;
POC	Prova de Conceito;
$q_e$	Capacidade de adsorção no equilíbrio;
$Q_{\text{máx}}$	Capacidade máxima de adsorção;
RMN de $^{13}\text{C}$	Ressonância Magnética Nuclear de Carbono 13;

RQ-MG	Rede Mineira de Química;
SAA	Sistemas de Abastecimento de Água;
SAC	Soluções Alternativas Coletivas;
SAI	Soluções Alternativas Individuais;
SBQ	Sociedade Brasileira de Química;
TIR	Taxa Interna de Retorno;
TMA	Taxa Mínima de Atratividade;
TRL	<i>Technology Readiness Level</i> (Nível de Maturidade Tecnológica);
UV-Vis	Espectroscopia na região do ultravioleta-visível;
VMP	Valor Máximo Permissível;
VPL	Valor Presente Líquido.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>21</b>
2.1. Objetivo geral .....	21
2.2. Objetivos específicos .....	21
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1. A problemática do Arsênio.....</b>	<b>22</b>
3.1.1. Panorama global .....	22
3.1.2. Cenário brasileiro .....	24
<b>3.2. Métodos para remoção de Arsênio da água.....</b>	<b>28</b>
3.2.1. Sistemas de remoção de arsênio pelo mundo .....	29
<b>3.3. Adsorção .....</b>	<b>31</b>
<b>3.4. Cana-de-açúcar .....</b>	<b>34</b>
3.4.1. O contexto econômico brasileiro.....	34
3.4.2. O bagaço de cana-de-açúcar.....	35
<b>3.5. A plataforma tecnológica do GFQO.....</b>	<b>37</b>
3.5.1. Bioadsorvente de Ânions (BAA) .....	39
<b>3.6. Contribuição para a Agenda 2030 .....</b>	<b>40</b>
<b>3.7. Escalonamento de tecnologia .....</b>	<b>42</b>
3.7.1. Nível de prontidão tecnológica.....	43
3.7.2. Etapas do processo de escalonamento tecnológico .....	45
3.7.3. Etapa 1: a pesquisa científica .....	45
3.7.4. Etapa 2: o desenvolvimento de produto .....	46
3.7.5. Etapa 3: o desenvolvimento de processo.....	47
3.7.6. Etapa 4: o desenvolvimento da planta piloto.....	48
3.7.7. Transferência de tecnologia para o mercado .....	49
<b>3.8. Propriedade intelectual nas ICTs .....</b>	<b>49</b>
<b>3.9. Inovação no Brasil.....</b>	<b>52</b>
3.9.1. O papel das universidades no ecossistema brasileiro de inovação.....	54
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1. Materiais .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2. Purificação dos solventes e reagentes .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3. Preparo do bagaço de cana-de-açúcar .....</b>	<b>57</b>
<b>4.4. Modificação do bagaço de cana-de-açúcar em escala de laboratório.....</b>	<b>58</b>
<b>4.5. Modificação do bagaço de cana-de-açúcar em escala piloto .....</b>	<b>58</b>



<b>4.6. Caracterização do bioadsorvente .....</b>	<b>59</b>
<b>4.7. Quantificação de arsênio e dos ânions presentes nas amostras .....</b>	<b>60</b>
<b>4.8. Experimentos de adsorção de arsênio .....</b>	<b>60</b>
4.8.1. Experimentos de adsorção em batelada.....	60
4.8.2. Experimentos de adsorção em contínuo .....	61
4.8.3. Experimentos de dessorção em contínuo .....	61
<b>4.9. Metodologia de escalonamento .....</b>	<b>62</b>
<b>4.10. Análise de viabilidade econômico-financeira .....</b>	<b>63</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>67</b>
<b>5.1. Aplicação do bioadsorvente no tratamento de efluente.....</b>	<b>67</b>
5.1.1. Programa de pré-aceleração Ideiaz.....	67
5.1.2. O sistema piloto de tratamento em modo contínuo .....	70
5.1.3. Proposta de remoção de sulfato do efluente .....	75
<b>5.2. Aplicação do bioadsorvente no tratamento de água .....</b>	<b>76</b>
5.2.1. Projeto Interinstitucional .....	76
5.2.2. Comparação do bioadsorvente com materiais concorrentes .....	77
5.2.3. Cinética de adsorção do bioadsorvente .....	78
5.2.4. Desenvolvimento do protótipo para aplicação do bioadsorvente.....	79
5.2.5. Certificação de inocuidade do bioadsorvente.....	83
5.2.6. Descarte, recuperação e reciclagem do bioadsorvente saturado .....	84
<b>5.3. Análise do processo produtivo do bioadsorvente .....</b>	<b>85</b>
5.3.1. Mapeamento do processo produtivo.....	85
5.3.2. Análise preliminar de custo dos produtos químicos.....	87
5.3.3. Otimização do processo produtivo do bioadsorvente.....	89
5.3.4. Análise de custo dos produtos químicos do processo otimizado .....	92
5.3.5. Validação do processo produtivo do bioadsorvente.....	94
5.3.6. Disponibilidade dos produtos químicos e química verde.....	95
5.3.7. Controle e fiscalização dos produtos químicos .....	96
5.3.8. Planta piloto de laboratório para produção do bioadsorvente .....	97
5.3.9. Potencial de geração de subprodutos a partir do efluente .....	107
<b>5.4. Análise da viabilidade econômica e financeira.....</b>	<b>111</b>
5.4.1. Componentes do MVP .....	111
5.4.2. Bens de capital.....	112
5.4.3. Consumo energético .....	113
5.4.4. Mão de obra.....	113
5.4.5. Estrutura de custos.....	114

5.4.6. Tributação e custos variáveis .....	114
5.4.7. Precificação .....	116
5.4.8. Fluxo de caixa .....	116
5.4.9. Indicadores financeiros.....	118
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO.....</b>	<b>121</b>
<b>7. PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>124</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>140</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>146</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>159</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A contaminação das águas naturais por arsênio é um problema de saúde pública mundial presente em mais de 100 países ao redor do mundo (BUNDSCHUH *et al.*, 2022). Diversas espécies minerais possuem arsênio em sua composição, o que contribui para a contaminação natural das águas subterrâneas. Por outro lado, a contaminação por arsênio do meio ambiente também pode ser gerada por atividades industriais (WHO, 2001).

De acordo com a Organização Mundial da Saúde, OMS (*World Health Organization*, WHO), os níveis de arsênio presentes na água subterrânea podem atingir concentrações acima de  $3 \text{ mg L}^{-1}$  em regiões vulcânicas e em locais onde os minerais de sulfeto estão presentes. Além disso, a concentração de arsênio em rios e lagos pode alcançar  $5 \text{ mg L}^{-1}$  em regiões próximas às fontes industriais de contaminação (WHO, 2001).

A população presente nas regiões onde a concentração de arsênio supera o limite de  $10 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ , estabelecido pela OMS para água de consumo humano, é afetada diretamente pelo consumo de água contaminada. Não obstante, a intoxicação pode ocorrer de forma indireta pelo consumo de alimentos que foram cultivados em solo contaminado com arsênio (BUNDSCHUH *et al.*, 2022; WHO, 2001).

Os efeitos negativos da exposição ao arsênio pela água de consumo são potencializados em países em desenvolvimento (BUNDSCHUH *et al.*, 2022). No Brasil, a presença do contaminante é observada em fontes de água de diversas regiões, como é o caso do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. Além da região apresentar uma ocorrência natural de minerais de arsênio, houve um longo período de exploração mineral que pode ter contribuído para a contaminação dos recursos hídricos (TEIXEIRA *et al.*, 2020).

Diversos métodos de tratamento para remoção de arsênio estão sendo aplicados ao redor do mundo (HERING *et al.*, 2017). No entanto, o descarte dos resíduos gerados pelos processos de tratamento deve ser considerado para evitar que o contaminante retorne para o meio ambiente (CLANCY; HAYES; RASKIN, 2013). Dentre os métodos utilizados, a adsorção apresenta elevada eficiência e viabilidade econômica quando comparada com outras operações unitárias de tratamento de água empregadas para remoção de contaminantes específicos como o arsênio (KUMAR *et al.*, 2019).

Novos adsorventes à base de materiais renováveis vêm sendo relatados na literatura (ASERE; STEVENS; DU LAING, 2019). Os adsorventes podem apresentar seletividade para remoção de contaminantes específicos como o arsênio e capacidade de regeneração, características que possibilitam o aumento da vida útil dos sistemas de tratamento. Nesse contexto, mostra-se relevante o desenvolvimento de materiais adsorventes seletivos e recuperáveis que utilizam como base tecnológica resíduos industriais biodegradáveis (WEERASUNDARA; OK; BUNDSCHUH, 2021).

O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo da indústria sucroalcooleira largamente produzido no Brasil. Mesmo após o aproveitamento desse subproduto em caldeiras de elevada pressão para produção de energia (bioeletricidade) e vapor de água para plantas industriais, uma grande quantidade de bagaço de cana ainda poderia ser direcionada para a produção de novos materiais e bioprodutos de valor agregado, haja visto que existe um excedente de bagaço que pode variar de 22 % a 70 % nas indústrias sucroalcooleiras no estado de Minas Gerais e no Brasil, dependendo da potência instalada da caldeira, da configuração e da eficiência da planta (BARRETO, 2020; HERRERA ADARME *et al.*, 2022). Dessa maneira, é possível transformar um material de baixo valor agregado da indústria em tecnologias de elevado valor agregado, contribuindo com o desenvolvimento de uma economia circular de base biológica.

O Grupo de Físico-Química Orgânica (GFQO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) tem trabalhado no desenvolvimento de tecnologias de adsorção empregando bagaço de cana-de-açúcar como material suporte para produção de novos bioadsorventes. Essa tecnologia de base renovável tem como objetivo a remoção de elementos contaminantes em meios aquosos, tais como metais, ametais, éter-aminas e corantes têxteis (GURGEL; FREITAS; GIL, 2008; MAIA *et al.*, 2020; PEREIRA; GURGEL; GIL, 2010; RAMOS *et al.*, 2015; XAVIER *et al.*, 2018; GUSMÃO *et al.*, 2014; FIDELES *et al.*, 2019).

Além de contribuírem para o alcance do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, relacionado ao aumento da disponibilidade de água potável, os bioadsorventes desenvolvidos pelo GFQO também contribuem com o ODS 12, que visa assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis, uma vez que o bagaço de cana-de-açúcar é utilizado como base das tecnologias (ONU, 2015).

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como ponto de partida a identificação de mercados potenciais para a aplicação do bioadsorvente seletivo para

remoção de arsênio de meios aquosos, considerando dois cenários: 1) a presença de arsênio no efluente gerado pela mineração de ouro e 2) a presença de arsênio na água subterrânea utilizada como fonte alternativa em Ouro Preto, MG.

Para isso, foi considerada a tecnologia de produção de um bioadsorvente seletivo para remoção de arsênio de água em desenvolvimento no GFQO, a qual emprega o bagaço de cana-de-açúcar como suporte sólido e o método denominado “ETM”, que usa os reagentes epicloridrina e trietilamina para funcionalização desse suporte sólido com grupos químicos capazes de adsorver as espécies de arsênio.

Em seguida, a otimização do processo produtivo visando o aumento de escala de produção do bioadsorvente em reator de aço inoxidável 304 foi realizada para simular o processo de produção industrial. Além disso, a tecnologia foi testada em um sistema piloto de tratamento contínuo e comparada com materiais concorrentes. Os custos envolvidos na produção da tecnologia foram avaliados e a viabilidade do modelo de negócio inicial foi estimada e apresentada.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Estudar a aplicação da tecnologia adsorvente à base de bagaço de cana-de-açúcar em um sistema com amostra contaminada por arsênio proveniente de fonte natural ou antrópica, considerando as demandas de mercado para o desenvolvimento de produto, os aspectos técnicos do aumento de escala e a viabilidade econômica e financeira do modelo de negócio.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Identificar mercados potenciais para a aplicação da tecnologia bioadsorvente de ânions (BAA);
- Submeter o BAA a testes de desempenho para remoção de arsênio, simulando as condições identificadas no mercado e com água natural e efluente industrial;
- Comparar o desempenho de remoção de arsênio do BAA com materiais comerciais;
- Propor um protótipo para utilização do BAA em uma solução para o tratamento de água subterrânea contaminada com arsênio;
- Verificar a inocuidade do BAA para o tratamento de água de consumo;
- Mapear e otimizar o processo de produção do BAA para produção em maior escala;
- Avaliar os custos de produção do BAA, comparando o processo otimizado com a produção em maior escala;
- Produzir o material em maior escala, utilizando o método ETM e um reator que simule as características da produção industrial;
- Avaliar as questões regulatórias e ambientais relacionadas à produção e utilização da tecnologia, incluindo as autorizações de uso dos reagentes;
- Avaliar a viabilidade econômico-financeira do modelo de negócio, a partir da definição do mercado potencial e com produção equivalente à planta piloto do GFQO.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1. A problemática do Arsênio

##### 3.1.1. Panorama global

Segundo a United Nations International Children's Emergency Fund, [UNICEF \(2018\)](#), mais de 140 milhões de pessoas consomem água contaminada com arsênio fora do padrão de potabilidade determinado pela OMS. De acordo com [Bundschuh et al. \(2022\)](#), esse número pode chegar a 200 milhões de indivíduos em pelo menos 105 países ao redor do mundo. São exemplos de países que possuem contaminação da água por arsênio: Argentina, Austrália, Bangladesh, Brasil, Chile, China, EUA, Índia, Japão, México, Tailândia, Taiwan e Vietnã ([UNICEF, 2018](#)).

Os problemas relacionados à exposição por arsênio na América Latina foram identificados há mais de 100 anos. Dos países que compõem o continente, 70 % são afetados pela contaminação por arsênio. Cerca de 14 milhões de pessoas na região consomem água contaminada por arsênio acima da concentração de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ , estabelecida pela OMS como limite para água de consumo humano ([KUMAR et al., 2019](#); [TEIXEIRA et al., 2020](#)).

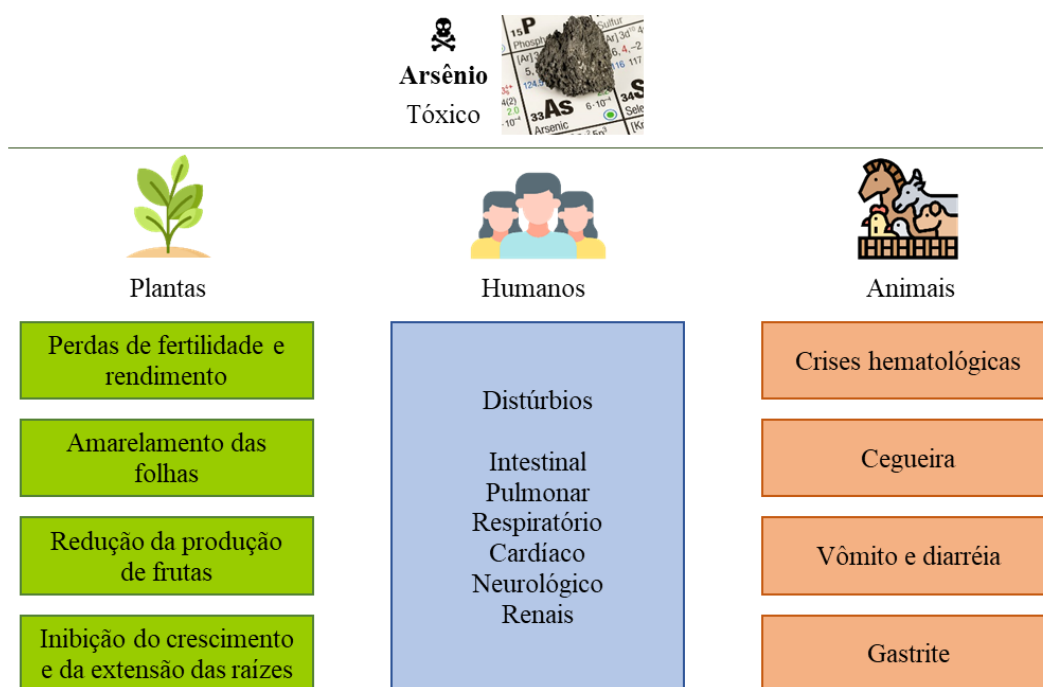
O arsênio é o 20º elemento mais comum na crosta terrestre, presente em mais de 200 espécies minerais. A arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ) é a espécie mineral que possui arsênio em sua composição mais abundante no planeta. As espécies inorgânicas de arsênio com elevada toxicidade, arsenito - As (III) e arsenato - As (V), são as mais encontradas em corpos d'água ([WHO, 2001](#)).

O elemento arsênio pode apresentar-se naturalmente no meio ambiente ou por meio da contaminação por fontes antropogênicas. As principais fontes de contaminação antropogênicas por arsênio estão relacionadas à mineração e fundição de metais não ferrosos, como ouro, chumbo, cobre e níquel, bem como ao processo de queima de combustíveis fósseis ([WHO, 2001](#)). Historicamente o arsênio foi utilizado em larga escala na produção de pesticidas agrícolas, em processos para preservação de madeira e na fabricação de vidro, o que gerou a contaminação de solos e água ([WHO, 2001](#)).

O arsênio está no topo da lista de prioridades do Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos Estados Unidos ([ATSDR, 2007](#)). O ametal foi o primeiro elemento químico a ter suas propriedades reconhecidas como carcinogênicas ([REIMANN et al., 2009](#)). Se ingerido por seres humanos o arsênio provoca o surgimento de lesões na

pele, doenças cardiovasculares, vários tipos de câncer, natimortos e impactos negativos no desenvolvimento cognitivo de crianças (UNICEF, 2018). Os efeitos da exposição ao arsênio são percebidos nas plantas, em humanos e animais, conforme apresentado na Figura 1.

**Figura 1** – Efeitos da exposição ao arsênio em plantas, seres humanos e animais



Fonte: Adaptado de [Rathi e Kumar \(2021\)](#).

Em decorrência dos prejuízos causados à saúde humana pela exposição prolongada ao arsênio, mesmo em baixas concentrações, a recomendação dos órgãos de saúde vem se tornando mais restritiva ao longo dos anos. Até 1963, a OMS recomendava como limite máximo a concentração de  $50 \mu\text{g L}^{-1}$  de arsênio para água de consumo humano (CUNHA; DUARTE, 2008).

A partir de 1993, a recomendação para água potável foi reduzida para uma concentração de até  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  de arsênio. A redução de cinco vezes do valor recomendado foi embasada por diversos estudos que confirmaram o potencial efeito carcinogênico de algumas espécies inorgânicas de arsênio (CUNHA; DUARTE, 2008).

Dentre os efeitos negativos relacionados à presença de arsênio na água, os aspectos sociais, sobretudo a diferença de gênero, também devem ser levados em consideração. A livre circulação das mulheres em alguns países subdesenvolvidos não é permitida e, dessa forma, elas acabam sendo impedidas de realizar coleta de água em



poços comunitários com água tratada, forçando o consumo dos poços caseiros que possuem água contaminada com arsênio (BUNDSCHUH *et al.*, 2022).

Visando contribuir com uma solução global para o problema relacionado ao arsênio, Bundschuh *et al.* (2022) sugeriram a criação de uma plataforma internacional para compartilhamento de conhecimentos, experiências e possíveis fontes de recursos. A proposta propõe a criação de uma base de dados sobre os locais em que o arsênio se apresenta de forma natural, os corpos hídricos e as regiões onde os solos estão contaminados, os níveis de contaminação, os efeitos nos seres humanos e as práticas de remoção de arsênio adotadas (BUNDSCHUH *et al.*, 2022).

Segundo Bundschuh *et al.* (2022), diversas entidades estariam envolvidas na proposta, incluindo pesquisadores, profissionais da área ambiental, comunidades locais, agências de saúde, organizações governamentais e associações sem fins lucrativos, que seriam responsáveis pela alimentação da plataforma com as informações. A base de dados também seria disponibilizada aos setores que possam ter relação com a contaminação por arsênio, tais como agricultura e mineração (BUNDSCHUH *et al.*, 2022).

Ainda segundo Bundschu *et al.* (2022), a formação dessa rede possibilitaria a disseminação do conhecimento relacionado ao arsênio por meio de uma cooperação internacional, contribuindo para a prevenção de doenças e facilitando a aplicação de soluções economicamente viáveis. Além disso, espera-se que as informações contidas na plataforma sirvam de base para criação de políticas públicas e normas de controle, além de auxiliar as agências internacionais de financiamento na avaliação de projetos voltados para o tema (BUNDSCHUH *et al.*, 2022).

### 3.1.2. Cenário brasileiro

A contaminação por arsênio tem sido um problema ambiental e de saúde pública de longo prazo no Brasil. A contaminação por atividades antrópicas, sobretudo pela mineração, vem sendo um fator relevante desde o século XVIII. A literatura mostra que pelo menos três (norte, sudeste e sul) das cinco regiões brasileiras apresentam contaminação de solo, sedimentos e fontes de água por arsênio (BUNDSCHUH *et al.*, 2012). Apesar dos registros não apresentarem locais contaminados no nordeste e centro-oeste, uma análise das regiões em que houve mineração ou produção de carvão pode contribuir com a identificação de novas áreas contaminadas por arsênio (TEIXEIRA *et al.*, 2020).

Milhões de toneladas de arsênio foram liberadas no meio ambiente durante as atividades de mineração que se iniciaram há mais de 300 anos no Brasil com a exploração artesanal de ouro e diamantes, levando a um descarte inadequado dos resíduos de mineração que contaminou os solos e a água de várias regiões brasileiras (TEIXEIRA *et al.*, 2020).

Segundo Teixeira *et al.* (2020), a região norte apresenta contaminação por arsênio no município de Santana, na Serra Pelada e em outras regiões do estado do Amapá. A mineração de manganês no estado iniciou-se em 1949 na Serra do Navio, sendo a primeira mineração comercial da Amazônia. A exploração de manganês produziu 20 milhões de toneladas de resíduos contendo arsenopirita. Os teores médios de arsênio encontrados na água e em sedimentos foram de  $539 \text{ mg L}^{-1}$  e  $388 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente (TEIXEIRA *et al.*, 2020). A mineração de ouro também contribuiu com a contaminação por arsênio no estado do Amapá, onde os garimpos utilizavam mercúrio para concentrar ouro e, dessa forma, essa prática artesanal liberou, não só arsênio, mas também mercúrio para o meio ambiente (SANTOS *et al.*, 2003).

De acordo com Sakuma *et al.* (2010), outra região afetada foi o Vale da Ribeira, localizado na bacia do rio Ribeira que se estende do sul do estado de São Paulo ao Leste do estado do Paraná. Dos 31 municípios presentes na região, foram selecionados Iporanga (São Paulo), Cerro Azul e Adrianópolis (Paraná) para um estudo que revelou a contaminação por arsênio da urina de crianças de 7 a 14 anos. A região de Iporanga teve a amostra com o nível mais elevado de arsênio, de  $8,94 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ , justificado pela presença de arsenopirita oriunda da mineração. Os teores de arsênio em amostras de sedimentos também foram determinados na região, apresentando valores entre 3,0 e  $13,3 \text{ mg kg}^{-1}$  (SAKUMA *et al.*, 2010).

O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) avaliado em 2010 nos estados do Paraná e São Paulo chegou a 0,84 em algumas cidades, já no Vale da Ribeira, o IDH variou entre 0,64 e 0,75 (IBGE, 2010). A diferença de IDH entre as regiões afetadas pode ter relação com a ocorrência de arsênio na água e nos solos (TEIXEIRA *et al.*, 2020).

Minas Gerais é um dos estados brasileiros mais ativos em produtividade mineral. O município de Paracatu e a região do quadrilátero ferrífero, composta pela capital do estado e mais 23 municípios, vêm sendo monitorados devido ao histórico de mineração de ouro dessas regiões (TEIXEIRA *et al.*, 2020).

Estudos evidenciaram a presença de arsênio em regiões que possuem minerais auríferos. O município de Paracatu, localizado na bacia do rio São Francisco, teve a jazida Morro do Ouro explorada durante décadas. Na região das minas, foram encontradas concentrações de arsênio em água de superfície de até  $40 \mu\text{g L}^{-1}$ , já os sedimentos apresentaram concentrações de arsênio de até  $313 \text{ mg kg}^{-1}$  (TEIXEIRA *et al.*, 2020).

A região do quadrilátero ferrífero foi contaminada com arsênio e outros elementos tóxicos ao longo dos 300 anos em que houve exploração de ouro. A exploração iniciou-se em Ouro Preto no ano de 1698 com processos artesanais e, no ano de 1817, o processo industrial foi iniciado na Mina da Passagem, localizada na cidade de Mariana, tendo uma produção estimada em 35 toneladas durante os 284 anos de operação. Já a mina Morro Velho, ainda em operação, localizada em Nova Lima produziu 450 toneladas de ouro ao longo de 100 anos (COSTA *et al.*, 2010).

Estima-se que a região do quadrilátero ferrífero produziu mais de 1.000 toneladas de ouro, quase 40 % da produção total brasileira dos últimos séculos. Como resultado da exploração, 390.000 toneladas de arsênio foram destinadas ao meio ambiente nesse período (BORBA *et al.*, 2003). As minas de ouro abandonadas, localizadas em Ouro Preto (Mina Velha, Chico Rei e Santa Rita), apresentaram teor de arsênio em sedimentos entre  $465\text{-}1.829 \text{ mg kg}^{-1}$ . Já a água coletada em regiões próximas a Ouro Preto e Mariana apresentou valores entre  $36,7$  e  $68,3 \mu\text{g L}^{-1}$  de arsênio (TEIXEIRA *et al.*, 2020).

Amostras de solo coletadas em Nova Lima, Santa Bárbara e Mariana apresentaram concentrações médias de arsênio de 960, 100 e  $53 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente. O rio Gualaxo do Norte, próximo do distrito de Antônio Pereira (Ouro Preto, MG) e o rio do Carmo, que recebem a água da Mina da Passagem, também apresentaram níveis elevados de arsênio em amostras de sedimentos (DESCHAMPS *et al.*, 2002; COSTA *et al.*, 2003).

Em 2015, o rompimento da barragem de Fundão no município de Mariana, MG, provocou o derramamento de rejeitos da mineração na bacia do rio Doce. A lama passou pelos rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Piranga até encontrar o rio Doce, após percorrer um total de 600 km, os rejeitos alcançaram a foz do rio Doce no oceano Atlântico (GUERRA *et al.*, 2017). O trabalho de Silva *et al.* (2018) apresentou uma análise da presença de contaminantes na região afetada antes e depois do rompimento da barragem e os resultados indicaram um aumento da contaminação por arsênio da água e dos sedimentos após o desastre.

Considerando o cenário nacional e as recomendações da OMS, o Brasil estabeleceu, em 2004, o Valor Máximo Permissível (VMP) de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  de arsênio para água potável, por meio da Portaria N° 518 do Ministério da Saúde. A normativa definiu o padrão de potabilidade para substâncias químicas que representam risco à saúde (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2004).

Apesar das alterações legislativas, o VMP de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  de arsênio, recomendado pela OMS para água potável, se manteve inalterado. A norma vigente é a Portaria GM/MS N° 888 de 2021, que *dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de qualidade*. A normativa é aplicável aos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) - geridos por concessionárias ou empresas públicas - e às Soluções Alternativas Coletivas (SAC) e Individuais (SAI) (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021).

Tendo em vista que os despejos industriais em corpos hídricos comprometem a manutenção das fontes de água superficiais e subterrâneas, o Conselho Nacional do Meio Ambiente estabeleceu os padrões de lançamento de efluentes por meio da Resolução CONAMA N° 430 de 2011. O controle da disposição de efluente contribui tanto para impedir o aumento dos níveis de arsênio em regiões em que o contaminante se apresenta de forma natural quanto para evitar o aparecimento do contaminante em novas regiões.

A Resolução CONAMA N° 430 de 2011 estabeleceu o limite de  $0,5 \text{ mg L}^{-1}$  de arsênio total como padrão de lançamento de efluente das fontes poluidoras e, no mesmo sentido, porém mais restritiva, a norma do estado de Minas Gerais, Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N° 1 de 2008, estabeleceu como limite para arsênio total uma concentração de  $0,033 \text{ mg L}^{-1}$  (CONAMA, 2011; COPAM, 2008).

Além do consumo direto de água contaminada, os riscos à saúde humana estão relacionados ao uso de solos contaminados com arsênio para agricultura, habitação e lazer. A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo estabeleceu, em 2014, diretrizes de qualidade do solo, definindo como limite máximo para arsênio 35, 55 ou  $150 \text{ mg kg}^{-1}$  para destino agrícola, residencial ou industrial, respectivamente (CETESB, 2014).

Diante da problemática relacionada ao arsênio que engloba o Brasil e diversos países no mundo, mostra-se relevante a busca por soluções que possibilitem a remoção do contaminante da água em regiões afetadas pela ocorrência de arsênio. Além disso, o monitoramento contínuo das regiões contaminadas, bem como a busca por novos pontos de investigação devem ser considerados pelos órgãos de controle ambiental e de saúde.

### 3.2. Métodos para remoção de Arsênio da água

A remoção de arsênio da água é realizada por métodos variados ao redor do mundo, sendo que os sistemas podem envolver coagulação e floculação, precipitação química, adsorção, troca iônica, separação por membranas, processos biológicos, nanofiltração e osmose reversa ou mesmo uma combinação de dois ou mais métodos (KATSOYIANNIS; ZOUBOULIS, 2004; MAHMOOD *et al.*, 2012; XU *et al.*, 2016).

A composição química da água subterrânea local é extremamente importante na escolha de um método adequado para remoção de arsênio (UNICEF, 2018). A presença de outros contaminantes aumenta substancialmente a dificuldade de remoção de arsênio, sendo exemplos dessas substâncias interferentes o fosfato, o nitrato, o sulfato, o cloreto, o flúor, os silicatos, o antimônio, dentre outros (HERING *et al.*, 2017; WEERASUNDARA; OK; BUNDSCHUH, 2021).

A presença de espécies de As(V) favorece o tratamento realizado por diversos métodos. O As(III) pode ser convertido em As(V) por meio de processos oxidativos que contribuem com o aumento do desempenho da maioria das tecnologias de remoção de arsênio (ASERE; STEVENS; DU LAING, 2019; HUG; LEUPIN; BERG, 2008; PETRUSEVSKI *et al.*, 2007; SIGDEL *et al.*, 2016).

A conversão do As(III) em As(V) pode ser realizada pela oxidação fotoquímica com incidência da luz solar (HUG; LEUPIN; BERG, 2008), eletroquímica com aplicação de eletrodo, química com aplicação de cloro, permanganato ou manganês (PETRUSEVSKI *et al.*, 2007) e biológica estimulada pela oxigenação (SIGDEL *et al.*, 2016). O emprego de filtros de areia carregados com manganês e adsorventes à base de Mn(IV) também são empregados para oxidação do As(III) (HERING *et al.*, 2017).

As técnicas de baixo custo mais comuns para remoção de arsênio da água subterrânea são a co-precipitação pela oxidação do ferro e seguida de adsorção (UNICEF, 2018). A presença natural de ferro dissolvido facilita a remoção de arsênio por meio da co-precipitação do contaminante com hidróxido de ferro na presença de oxigênio. A eficiência do tratamento é favorecida com o aumento dos teores de ferro dissolvido na água subterrânea, sendo utilizados filtros de areia ou adsorventes para a remoção do precipitado contendo arsênio (HUG; LEUPIN; BERG, 2008).

O método de remoção de arsênio de águas em regiões com baixas concentrações de ferro natural envolve o uso de adsorventes seletivos (HUG; LEUPIN; BERG, 2008).

Os adsorventes mais utilizados para a remoção de arsênio da água incluem carvão ativado, alumina ativada e óxidos de ferro (ASERE; STEVENS; DU LAING, 2019).

De acordo com Xu *et al.* (2016), a utilização de tecnologias como nanofiltração e osmose reversa apresentaram resultados positivos no que se refere à remoção de poluentes aniônicos, apesar disso, esses métodos apresentam elevado custo e geram uma grande quantidade de rejeitos. Os métodos de precipitação, coagulação e floculação, co-precipitação e eletrocoagulação são menos onerosos, contudo também formam um volume elevado de lodo tóxico (XU *et al.*, 2016).

### 3.2.1. Sistemas de remoção de arsênio pelo mundo

A contaminação por arsênio não é uma questão exclusiva de países subdesenvolvidos. Todos os anos são descobertos novos países e regiões que possuem corpos hídricos e solos contaminados. Os países desenvolvidos utilizam tecnologias de tratamento de água de elevado custo, o que torna a problemática do arsênio menos alarmante quando comparada às regiões mais pobres que não possuem sistemas robustos para remoção de arsênio (BUNDSCHUH *et al.*, 2022). Na Holanda, por exemplo, é possível encontrar sistemas que trabalham para alcançar uma concentração final de  $1 \mu\text{g L}^{-1}$  (AHMAD *et al.*, 2020).

As estações de tratamento de água nos EUA possuem uma capacidade média de  $10.400 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$  e, em geral, apresentaram sistemas de acordo com a concentração de arsênio encontrada. A adsorção é empregada para fontes de água com concentração em torno de  $50 \mu\text{g L}^{-1}$ , para os valores próximos de  $35 \mu\text{g L}^{-1}$ , utiliza-se a coagulação-filtração e para níveis de até  $22 \mu\text{g L}^{-1}$ , é utilizada a troca iônica (HERING *et al.*, 2017). Apesar da elevada capacidade das estações de tratamento, os EUA possuem mais de 2 milhões de pessoas expostas ao arsênio pelo consumo de água subterrânea com concentração acima de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  (BUNDSCHUH *et al.*, 2022).

Na Grécia a concentração de arsênio na água, geralmente, apresenta níveis abaixo de  $50 \mu\text{g L}^{-1}$ . O país possui oito estações de tratamento de água com capacidade entre  $480$  e  $2.400 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$  que utilizam sistemas de coagulação com sais de ferro ou adsorção em colunas. Os materiais utilizados nas colunas são à base de ferro ou óxido misto de ferro e manganês, sendo o material à base de manganês capaz de oxidar o As(III) a As(V) e adsorver o contaminante na forma de As(V) (KATSOYIANNIS; MITRAKAS; ZOUBOULIS, 2015; TRESINTSI *et al.*, 2013).

A concentração de arsênio na água subterrânea encontrada no norte da Itália apresenta valores de até  $100 \mu\text{g L}^{-1}$  e em outras regiões do país esse valor pode chegar a  $500 \mu\text{g L}^{-1}$ . As plantas de tratamento de água utilizam sistemas com configuração e composição variada, incluindo as operações de pré-oxidação, precipitação química com  $\text{FeCl}_3$ , adsorção em hidróxido de ferro granular, osmose reversa e troca iônica (HERING *et al.*, 2017).

O Irã também utiliza a operação de adsorção em hidróxido de ferro granular em cinco estações de tratamento de água contaminada por arsênio. A capacidade total de fornecimento de água tratada no país é de  $10.800 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$  e a concentração de arsênio encontrada é de até  $145 \mu\text{g L}^{-1}$  (HERING *et al.*, 2017).

O Chile possui 12 estações de tratamento de água em operação com capacidade de produção entre  $2.600$  e  $90.000 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ . A concentração de arsênio em fontes superficiais e subterrâneas de água varia entre  $16$  e  $500 \mu\text{g L}^{-1}$ . O processo de tratamento encontrado na maioria das estações emprega oxidação seguida de coagulação, floculação e filtração (HERING *et al.*, 2017).

Segundo Hering *et al.* (2017), o processo de coagulação/filtração é otimizado com o ajuste da dosagem de coagulante e do pH da água nas plantas chilenas, doses de até  $56 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{FeCl}_3$  são utilizadas como coagulante e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  é adicionado para ajuste de pH. A remoção de As(III) pelo emprego de  $\text{FeCl}_3$  como coagulante apresenta uma eficiência de 40-70 %, já na presença das espécies de As(V), o método de tratamento é capaz de remover 80-100 % do contaminante. As operações de adsorção, osmose reversa e ultrafiltração também são utilizadas em algumas estações de tratamento do país (HERING *et al.*, 2017).

A Guatemala também utiliza o processo de coagulação/filtração com  $\text{FeCl}_3$  para tratar cerca de  $4.400 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$  de água subterrânea contendo  $150 \mu\text{g L}^{-1}$  de arsênio. Um meio filtrante cerâmico é utilizado para reduzir a cor e a presença de ferro na água produzida (GARRIDO HOYOS *et al.*, 2013).

Na Argentina, a presença de sílica e flúor na água prejudica a remoção de arsênio. A província de Santa Fé utiliza osmose reversa no sistema de tratamento que possui capacidade de até  $2.400 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ . O país também possui estações de tratamento com capacidade de  $150-850 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$  que utilizam como coagulante cloreto de polialumínio e sistemas de filtração em duas etapas para a remoção simultânea de arsênio e flúor (HERING *et al.*, 2017).



O Vietnã possui 13 estações de tratamento de água subterrânea com capacidade de produção total de  $800.000 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$  para abastecer cerca de seis milhões de pessoas. A água que chega nas estações possui elevadas concentrações de Fe(II) e apresenta concentração de arsênio acima de  $350 \mu\text{g L}^{-1}$  (HERING *et al.*, 2017).

Mesmo antes da descoberta da contaminação por arsênio das águas subterrâneas no Vietnã, grande parte do contaminante já era removido nas estações de tratamento pela precipitação oxidativa com o ferro natural, seguida de filtros de areia. A água produzida pelo processo aeração-sedimentação-filtração alcançou concentrações menores do que  $30 \mu\text{g L}^{-1}$  de arsênio (HERING *et al.*, 2017). Além disso, foi observada uma remoção adicional de arsênio pela adsorção do contaminante em hidróxido de ferro, gerado pela corrosão da tubulação de ferro empregada na distribuição de água (BERG *et al.*, 2001).

As tecnologias convencionais para tratamento de água e efluentes industriais possuem limitações para a remoção de elementos tóxicos em concentrações abaixo de  $100 \text{ mg L}^{-1}$ . A aplicação de adsorventes como etapa de polimento em sistemas de tratamento tem se mostrado efetiva nos casos em que os elementos tóxicos se encontram diluídos em solução (ABDOLALI *et al.*, 2014; GURGEL *et al.*, 2008). A adsorção tem sido considerada adequada para os países em desenvolvimento devido à flexibilidade de implantação dos sistemas, a simplicidade de operação, ao potencial de regeneração dos materiais e a baixa geração de lodo tóxico (ASERE; STEVENS; DU LAING, 2019; FU; WANG, 2011).

### 3.3. Adsorção

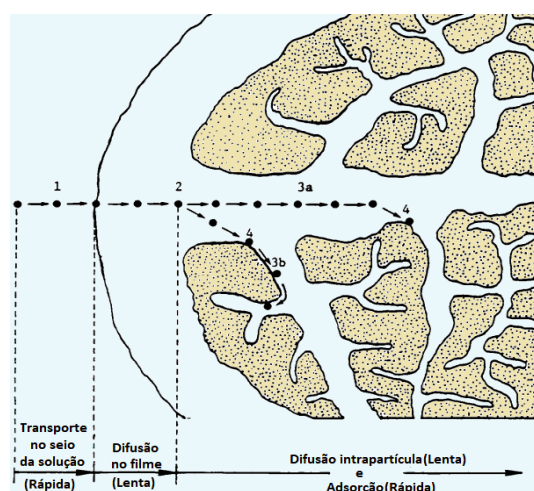
A adsorção é uma operação unitária de transferência de massa em fase fluida (líquida ou gasosa), em que uma molécula ou partícula (adsorvato) é transferida do fluido para a superfície de um sólido (adsorvente). A interação do adsorvente com o adsorvato é definida pela natureza da força envolvida na adsorção. A adsorção física (fisiossorção) é um fenômeno não específico que envolve forças de *van der Waals* e interação de caráter eletrostático. Na adsorção química (quimiossorção), o adsorvato forma ligações químicas com os sítios ativos do adsorvente por meio da troca ou compartilhamento de elétrons (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Segundo Weber e Smith (1986), na adsorção, a transferência de espécies solúveis da fase líquida para a superfície de um adsorvente é governada pela dinâmica específica do sistema e resulta em uma distribuição de equilíbrio característica do soluto (partição de fase). No caso de adsorventes microporosos, a adsorção de soluto consiste nas etapas apresentadas



na [Figura 2](#): 1) transporte do soluto do seio da solução para a camada limite hidrodinâmica que envolve a partícula; 2) transporte difusivo através da camada limite (difusão externa ou no filme); 3) transporte difusivo através dos poros internos e/ou ao longo da superfície da parede dos poros (difusão superficial ou intrapartícula); e 4) adsorção ou fixação da partícula de soluto em um sítio adsorvente ([WEBER e SMITH, 1986](#)).

**Figura 2** – Etapas envolvidas na adsorção em adsorventes porosos



Fonte: [Weber e Smith \(1986\)](#).

A efetividade da adsorção tem relação com o tempo de contato do fluido com o adsorvente, o formato e tamanho das partículas, o modo de operação (batelada ou contínuo), a temperatura de trabalho, o pH da solução, a concentração de adsorvato e as propriedades físico-químicas do adsorvente e do adsorvato ([MALIK; JAIN; YADAV, 2018](#)). Além disso, a presença de outras moléculas e partículas no fluido também interfere na capacidade de adsorção do material ([THIRUNAVUKKARASU; NITHYA; SIVASHANKAR, 2021](#)).

A adsorção pode ser aplicada nos sistemas de tratamento em batelada ou em contínuo. O sistema em batelada ocorre por meio do contato de uma quantidade fixa de adsorvente com um volume fixo de fluido sob agitação ([PATEL, 2019](#)). Esse modo de operação é utilizado para dimensionamento das unidades de tratamento ou desenvolvimento de novos adsorventes, sendo os parâmetros de controle específicos a velocidade de agitação e o tempo de operação ([LEUDJO TAKA et al., 2021](#)). Os ensaios em batelada fornecem a capacidade máxima de adsorção do adsorvente e o tempo de equilíbrio por meio dos estudos de isoterma e de cinética de adsorção, respectivamente ([NASCIMENTO et al., 2014](#)).

O modo contínuo consiste em sistemas tubulares preenchidos com o adsorvente onde o fluido escoar ao longo de uma coluna. Esse modo é capaz de operar com grandes volumes e demanda um espaço físico consideravelmente menor quando comparado com o modo batelada (LEUDJO TAKA *et al.*, 2021). Os parâmetros de controle específicos são a vazão de entrada do fluido, o tipo de fluxo (ascendente ou descendente), a altura do leito e o empacotamento da coluna (MALIK; JAIN; YADAV, 2018). O fluxo ascendente evita a formação de caminhos preferenciais na passagem do fluido pela coluna, já a altura do leito tem relação direta com o tempo de contato do fluido com o adsorvente na coluna, o que influencia no dimensionamento do sistema (THIRUNAVUKKARASU; NITHYA; SIVASHANKAR, 2021).

Os bioadsorventes são materiais adsorventes que podem ser produzidos a partir de diversos tipos de biomassa, seja ela animal ou vegetal. O desenvolvimento de novos bioadsorventes preparados a partir da transformação química de materiais lignocelulósicos renováveis e biodegradáveis vem sendo relatado na literatura como uma alternativa promissora para o tratamento de água e efluentes contaminados com arsênio (MAIA; SOARES; GURGEL, 2021).

Os bioadsorventes seletivos são aplicáveis em sistemas específicos capazes de remover íons que possuem elevada afinidade com sítios de adsorção contidos na estrutura do material (WEERASUNDARA; OK; BUNDSCHUH, 2021). A seletividade é uma vantagem de determinados materiais adsorventes, pois contribui para a remoção de arsênio de regiões que possuem a coexistência de ânions como fosfato, sulfato, nitrato e cloreto (MAIA; SOARES; GURGEL, 2021).

A possibilidade de recuperação do adsorvente e do adsorvato por meio do processo de dessorção é outra vantagem da adsorção. Os adsorventes recuperáveis podem ser utilizados em vários ciclos de adsorção (ALMEIDA *et al.*, 2016). Os materiais seletivos e recuperáveis são capazes de aumentar a vida útil e de reduzir os custos das unidades de tratamento (WEERASUNDARA; OK; BUNDSCHUH, 2021).

O aumento de escala de produção das tecnologias e a presença de moléculas ou partículas nos sistemas reais que competem pelos sítios ativos do adsorvente são desafios que devem ser considerados no desenvolvimento dos bioadsorventes para remoção de arsênio (MAIA; SOARES; GURGEL, 2021).

O uso de amostras reais em sistemas de tratamento piloto é indispensável para o sucesso dos novos materiais. A utilização de sistemas que simulam a escala real

(determinada em função da quantidade de água a ser tratada) possibilita otimizar os parâmetros operacionais, evitar falhas e aprimorar as estimativas de custo dos sistemas (HERING *et al.*, 2017; MAIA; SOARES; GURGEL, 2021).

O bagaço de cana-de-açúcar destaca-se por apresentar características favoráveis para a utilização como suporte sólido para produção de bioadsorventes. A introdução de grupos funcionais na estrutura do bagaço de cana pode transformar esse resíduo em um material de elevado valor agregado, elevada capacidade de adsorção e elevada seletividade para remoção de elementos tóxicos (XU *et al.*, 2016).

### **3.4. Cana-de-açúcar**

#### **3.4.1. O contexto econômico brasileiro**

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. De acordo com a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP), a produção brasileira de cana-de-açúcar superou 635 milhões de toneladas na safra 2019/2020. A região sudeste possui maior representatividade na produção nacional de cana-de-açúcar, com 63 % da produção brasileira, o que representou na safra de 2019/2020, 400 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (FIESP, 2020).

As projeções da FIESP para 2029/2030 mostram uma expectativa de aumento de 35 % na produção de cana-de-açúcar, o que representa uma produção nacional de 857 milhões de toneladas distribuídas por 10,9 milhões de hectares em todo o Brasil. Os produtos gerados a partir do processamento da cana-de-açúcar são o etanol de primeira geração e o açúcar, levando ao consumo de cana para produção desses commodities de 66 % e 34 %, respectivamente (FIESP, 2020).

Cada tonelada de cana-de-açúcar processada pela indústria sucroalcooleira gera de 250 a 280 kg de bagaço contendo aproximadamente 50 % de umidade, ou seja, 125-140 kg de bagaço por tonelada de cana, o que torna esse resíduo industrial uma fonte economicamente viável de biomassa de fácil obtenção no Brasil (ANDREOLI; LINARDI, 2008).

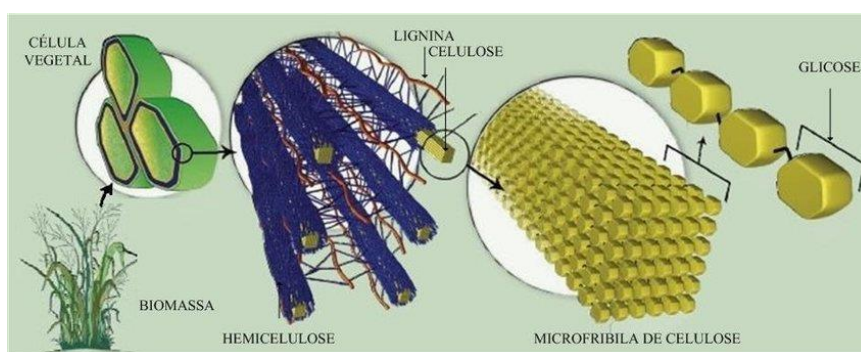
Considerando a safra de 2019/2020, a geração de bagaço de cana-de-açúcar em base seca pode ter alcançado quantidades em torno de 79 a 89 milhões de toneladas. De acordo com os valores projetados para a safra de 2029/2030, esse valor pode chegar a mais de 120 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar (FIESP, 2020; ANDREOLI; LINARDI, 2008).

A despeito da utilização do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de energia nas caldeiras, uma parcela excedente de até 12 % da geração total de bagaço poderia ser utilizada como insumo de novos processos industriais, o que representa uma disponibilidade de até 10 milhões de toneladas de bagaço, considerando a safra de 2019/2020 (ALBERTINI; DO CARMO; DO PRADO FILHO, 2007; FIESP, 2020).

### 3.4.2. O bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo gerado pela indústria sucroalcooleira a partir da produção de açúcar e etanol de primeira geração. O resíduo agroindustrial é um material lignocelulósico que possui uma estrutura complexa e resistente, caracterizada pela composição química majoritariamente baseada em celulose, hemiceluloses e lignina, conforme apresentado na Figura 3 (MAURYA; SINGLA; NEGI, 2015).

**Figura 3** – Representação estrutural celular da cana-de-açúcar



**Fonte:** Yarris (2010).

A composição química média de 60 amostras de bagaço de cana-de-açúcar coletadas em diferentes indústrias sucroalcooleiras do estado de São Paulo até os estados do nordeste brasileiro, pertencentes às variedades RB867515, SP81-3250, RB855453, RB72454 e SP83-2847, distribuída em termos percentuais, é  $42,2 \pm 1,9$  % de celulose,  $27,6 \pm 0,9$  % de hemiceluloses,  $21,6 \pm 1,7$  % de lignina,  $2,8 \pm 1,2$  % de inorgânicos (expressos como cinzas) e uma pequena fração de outras macromoléculas, como polifenóis, pectina e proteínas ( $5,6 \pm 2,3$  %) (ROCHA *et al.*, 2015).

A celulose compõe a estrutura da parede celular das plantas e pode ser encontrada em gramíneas e plantas superiores (árvores), além de estar presente em resíduos agroindustriais. A estrutura multidimensional da celulose torna esse biopolímero uma fonte alternativa para a produção de biomateriais com múltiplas funções (LI *et al.*, 2021).

A cadeia polimérica presente na estrutura química da celulose é formada por unidades repetitivas de  $\beta$ -D-glicose unidas por ligações glicosídicas do tipo  $\beta(1 \rightarrow 4)$ , na

forma do dímero celobiose, e possuem grupos hidroxilas primário e secundários capazes de formar ligações de hidrogênio intra e intermoleculares, as quais são responsáveis pela rigidez das cadeias de celulose (LIU *et al.*, 2021). Os agregados de cadeias de celulose conferem elevada força de coesão e resistência à tensão ao biopolímero, o que torna a celulose insolúvel em água e em inúmeros solventes orgânicos (DING; HIMMEL, 2006).

A celulose apresenta regiões cristalinas, caracterizadas pelo elevado grau de ordenamento molecular; e regiões consideradas amorfas, formadas por unidades com ligações intermoleculares dispostas de forma irregular cujo baixo grau de ordenamento molecular possibilita a interferência química na cadeia polimérica da celulose por reações químicas e bioquímicas (KADLA; GILBERT, 2000).

As hemiceluloses, segundo polissacarídeo mais abundante depois da celulose, são encontradas na parede das células vegetais e apresentam função de conexão entre a celulose e a lignina, o que confere uma rigidez ao material lignocelulósico (CORTEZ, 2010; HENDRIKS; ZEEMAN, 2009). A interação das hemiceluloses com a celulose confere flexibilidade e estabilidade ao agregado vegetal (SAHA, 2003; NEGAHDAR; DELIDOVICH; PALKOVITS, 2016).

As hemiceluloses são formadas majoritariamente por açúcares de cinco átomos de carbono, como a  $\beta$ -D-xilose e a  $\alpha$ -L-arabinose, mas também contém açúcares de seis átomos de carbono, como a  $\beta$ -D-glicose, a  $\beta$ -D-galactose, a  $\beta$ -D-manose e derivados como ácido  $\beta$ -D-glicurônico e possuem uma estrutura altamente ramificada e amorfa, sendo suas cadeias principais formadas por unidades de açúcares de cinco átomos de carbono unidas por ligações do tipo  $\beta(1\rightarrow4)$  e consideradas curtas, quando comparadas às cadeias de celulose (SAHA, 2003; NEGAHDAR; DELIDOVICH; PALKOVITS, 2016). O heteropolissacarídeo é biodegradável, biocompatível e bioativo e, portanto, possui propriedades atraentes quando analisadas sob a ótica da aplicação industrial, sendo comumente aplicado em diversas áreas como no preparo de alimentos, na medicina, na geração de energia, além de ser um insumo da indústria química e de materiais poliméricos (PENG; SHE, 2014).

A lignina integra a parede celular da célula vegetal e pode ser classificada como um macromolécula polifenólica contendo três unidades básicas, o álcool coniferílico, o álcool sinapílico e o álcool *p*-cumarílico, possuindo uma estrutura molecular complexa e heterogênea, caracterizada por regiões amorfas tridimensionais com grande quantidade

de ligações inter cruzadas do tipo éter ( $\alpha$ -O-4,  $\beta$ -O-4,  $\alpha$ -O- $\alpha$  e  $\beta$ -O- $\beta$ ) e carbono-carbono ( $\beta$ - $\beta$  e  $\beta$ -5), dentre outras (FENGEL; WEGENER; GREUNE, 1989; FELDMAN, 1985).

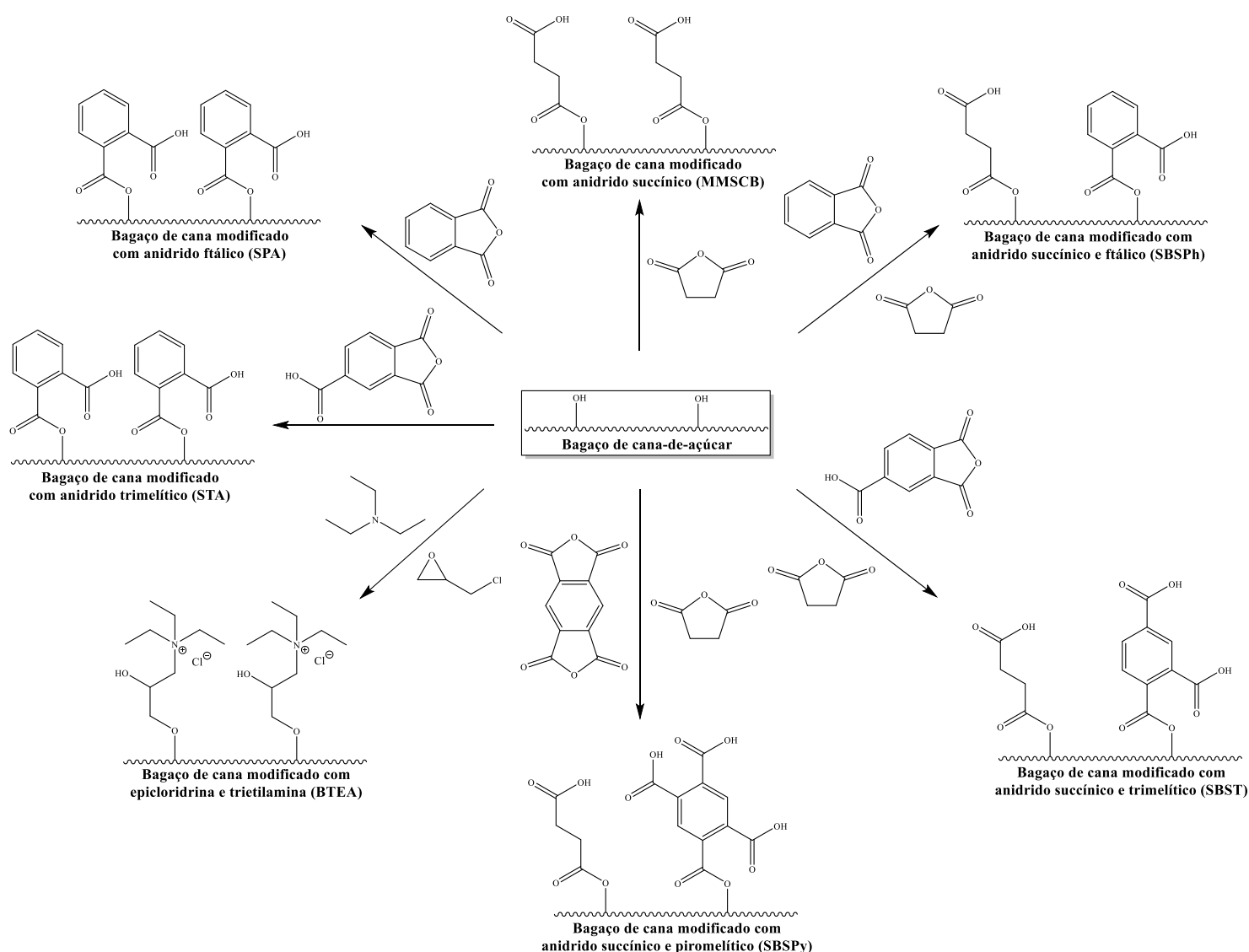
A organização (distribuição) estrutural e a composição da lignina dependem do tipo de vegetal (gramínea, madeira mole, madeira dura) e da matriz de carboidratos (celulose-hemiceluloses) presente no biomaterial (SANTOS *et al.*, 2012). A lignina fornece suporte estrutural e impermeabilidade aos tecidos vegetais, além de protegê-los de possíveis interferências químicas, biológicas e mecânicas externas (HENDRIKS; ZEEMAN, 2009; YAMAN, 2004).

Com essa grande diversidade química, vários bioprodutos têm sido desenvolvidos a partir do aproveitamento da biomassa lignocelulósica e mais especificamente do bagaço de cana-de-açúcar (SINGH; SHARMA; SAMBYAL, 2022). A utilização dessa biomassa lignocelulósica para o desenvolvimento de novas tecnologias aplicáveis no tratamento de água contaminada tem sido um dos principais objetivos do GFQO ao longo dos anos.

### 3.5. A plataforma tecnológica do GFQO

Visando contribuir com o desenvolvimento de soluções sustentáveis para o tratamento de água e efluentes industriais, o GFQO vem trabalhando na transformação química do bagaço de cana-de-açúcar em materiais bioadsorventes, conforme apresentado na Figura 4, para remoção, em meio aquoso, de íons de As(V), Cu(II), Cd(II), Ni(II), Co(II), Pb(II), Zn(II), Ca(II), Mg(II), além de substâncias orgânicas como corantes têxteis e éter-aminas utilizadas no processo de flotação reversa de minério de ferro. O processo de obtenção dos bioadsorventes engloba reações químicas por batelada, realizadas de acordo com o objetivo desejado na aplicação da tecnologia. O bagaço de cana-de-açúcar é lavado com solventes e submetido a um processo de modificação química que resulta na produção de um material de elevado valor agregado (GURGEL; FREITAS; GIL, 2008; PEREIRA; GURGEL; GIL, 2010; RAMOS *et al.*, 2015; XAVIER *et al.*, 2018; MAIA, 2020; FIDELES *et al.*, 2019; GUSMÃO *et al.*, 2014).

**Figura 4** – Representação da plataforma tecnológica do GFQO desenvolvida a partir da modificação química do bagaço cana-de-açúcar com diferentes reagentes



Fonte: Autoria própria (2022).

Dependendo do contaminante alvo de remoção, são utilizados diferentes reagentes para a inclusão de grupos funcionais específicos na estrutura da biomassa lignocelulósica (bagaço de cana-de-açúcar). O resultado desse processo é a obtenção de bioadsorventes, versáteis e seletivos. Outra característica relevante da tecnologia está relacionada à possibilidade de recuperação do bioadsorvente após sua saturação, o que contribui para o aumento da vida útil do bioadsorvente (GURGEL; FREITAS; GIL, 2008; PEREIRA; GURGEL; GIL, 2010; RAMOS *et al.*, 2015; XAVIER *et al.*, 2018; MAIA, 2020).

Os agentes modificantes de cada material, os principais parâmetros operacionais, os elementos testados para validação da Prova de Conceito (POC) experimental, bem como os códigos das patentes depositadas, são apresentados na Tabela 1.



**Tabela 1** – Parâmetros de síntese dos bioadsorventes do GFQO

Material	Agente(s) Modificante(s)	Temperatura (°C)	Tempo (h)	Agitação (rpm)	Prova de Conceito Experimental	Pedido de Patente	Referência
MMSCB	Anidrido succínico	100	4	300	Cu(II)   Cd(II)   Pb(II)	PI0702691-9	GURGEL; FREITAS; GIL, 2008
STA	Anidrido trimelítico	100	3	300	Co(II)   Cu(II)   Ni(II)	-	RAMOS <i>et al.</i> , 2015
SPA	Anidrido ftálico	100	3	300	Co(II)   Cu(II)   Ni(II)	-	RAMOS <i>et al.</i> , 2016
SBST	Anidrido succínico e trimelítico	100	11	300	Co(II)   Ni(II)	BR102017013780-5	ALMEIDA <i>et al.</i> , 2019
SBSPh	Anidrido succínico e ftálico	100	11	300	Co(II)   Ni(II)	BR102017013780-5	ELIAS <i>et al.</i> , 2019
BTEA	Epícloridrina e trietilamina	100	2,5	400	As(V)	-	MAIA <i>et al.</i> , 2020
SBSPy	Anidrido succínico e piromelítico	100	3	300	Cu(II)   Zn(II)	BR102017013780-5	TEODORO <i>et al.</i> , 2022

Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.5.1. Bioadsorvente de Ânions (BAA)

Dentre as tecnologias de adsorção desenvolvidas pelo GFQO, destaca-se o bioadsorvente preparado a partir da modificação química do bagaço de cana-de-açúcar pelo método denominado ETM, a partir do solvente *N,N*-dimetilformamida e dos reagentes epicloridrina e trietilamina. Inicialmente, a epicloridrina é utilizada como agente de ligação, possibilitando a inclusão do grupo amina na forma de amônio quaternário no bagaço de cana-de-açúcar. Dessa forma, o resíduo agroindustrial é transformado em uma tecnologia capaz de remover ânions de água e efluentes por meio de troca iônica (MAIA *et al.*, 2020).

Durante o desenvolvimento do bioadsorvente, foi definida a rota tecnológica e realizado um estudo de otimização multivariada, para identificar as quantidades ótimas de reagentes necessárias para a síntese do material com maior eficiência de remoção. A tecnologia foi aplicada em laboratório em amostras de soluções aquosas contaminadas com As(V). O material foi inicialmente preparado em menor escala, partindo-se de 0,5 g de bagaço de cana-de-açúcar, 15 mL de *N,N*-dimetilformamida, 6,4 mL de epicloridrina e 11 mL de trietilamina (MAIA *et al.*, 2020).

Em seguida, o material foi caracterizado para a confirmação da introdução da função amônio quaternário, responsável pela carga positiva, após a modificação química. Dentre as técnicas utilizadas, destacam-se a espectroscopia na região do infravermelho



com transformada de Fourier (FTIR), a ressonância magnética nuclear de carbono 13 (RMN de  $^{13}\text{C}$ ) no estado sólido, o ganho de massa, o teor de cloro e a análise elementar de C, H e N. Além disso, foram determinadas as propriedades texturais (área de superfície específica e distribuição do tamanho dos poros) e realizado um estudo do efeito do pH da solução aquosa na capacidade de adsorção de espécies de As(V) (MAIA *et al.*, 2020).

Os resultados das caracterizações realizadas comprovaram que a modificação química ocorreu de maneira muito satisfatória. O Bioadsorvente de Ânions (BAA) é seletivo para ânions porque possui balanço líquido de cargas superficial positivo após a inclusão dos grupos funcionais pela reação química. O material apresentou um valor para o pH de ponto de carga zero ( $\text{pH}_{\text{pcz}}$ ) de  $7,28 \pm 0,02$ , favorecendo a interação eletrostática entre o ânion As(V) e o bioadsorvente. Houve também um pequeno incremento na área superficial de  $1,6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  para  $2,0 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  e um ligeiro aumento na largura média dos poros de  $14,1 \text{ \AA}$  para  $22,5 \text{ \AA}$ , o que favorece a fisiossorção (MAIA *et al.*, 2020).

Os testes realizados em laboratório com amostras sintéticas (contaminadas artificialmente em laboratório) resultaram em um valor de capacidade de adsorção máxima ( $Q_{\text{máx}}$ ) de As(V) de  $39,7 \text{ mg g}^{-1}$ . Além disso, o BAA obteve um ganho de massa significativo após a modificação química, no valor de 27 %. Após a validação das características e funções críticas do material, houve um aumento de escala em laboratório da ordem de 22 vezes, partindo de uma quantidade inicial de bagaço de cana-de-açúcar de 11 g (MAIA *et al.*, 2020).

Devido à elevada capacidade de remoção de contaminantes em meio aquoso, o BAA tem se mostrado uma tecnologia promissora para o tratamento de águas e efluentes contaminados com As(V). Desta forma, o presente trabalho visa identificar mercados potenciais para a aplicação do BAA para remoção de arsênio, bem como aumentar a escala de produção da tecnologia.

### **3.6. Contribuição para a Agenda 2030**

O desenvolvimento de soluções para o tratamento de água e efluentes vai ao encontro do movimento de garantia do fornecimento de água limpa e segura discutido desde 1977 pelas Nações Unidas. Na conferência intergovernamental daquele ano, foi estabelecido que “Todos os povos, seja qual for o seu estágio de desenvolvimento e as suas condições sociais e econômicas, têm direito a ter acesso a água potável em quantidade e qualidade igual às suas necessidades básicas” (ONU, 2015).

Visando a uma maior atenção global ao tema, a Assembleia Geral das Nações Unidas realizada em 2010 reconheceu o acesso à água limpa e segura como direito humano essencial, por meio da Resolução 64/292 (UNITED NATIONS, 2010). No mesmo sentido, foi estabelecido em 2015 um pacto global com 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), também chamado de Agenda 2030. O pacto tem como objetivo acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e garantir paz e prosperidade para as pessoas em qualquer lugar do planeta (ONU, 2015).

A Sociedade Brasileira de Química (SBQ) lançou o “Movimento Química Pós 2022 – Sustentabilidade e Soberania” com o objetivo de promover ações que levem em consideração a Agenda 2030 da ONU (SBQ, 2022). O plano de ação denominado “Química e Seus Atores para um Brasil Sustentável e Soberano” mostra a importância da consolidação de parcerias entre o governo, o setor privado, as universidades e a sociedade civil (SILVA *et al.*, 2022).

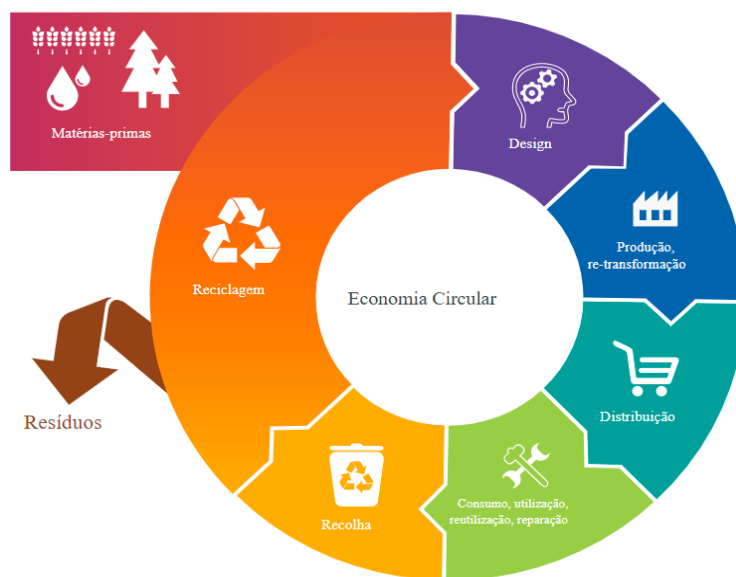
O objetivo 6 da Agenda 2030, intitulado “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos”, tem como premissa o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos. A melhoria da qualidade da água pela redução do despejo de águas residuais não tratadas e o aumento da utilização de água de reuso nas indústrias também compõem as ações globais desejadas até 2030 (IPEA, 2019a).

Por outro lado, a utilização do bagaço de cana-de-açúcar como base para o desenvolvimento de tecnologias de elevado valor agregado contribui com o ODS 12 que visa assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis (IPEA, 2019b). A transformação de um resíduo industrial em insumo de um novo processo está alinhada com os conceitos de bioeconomia e economia circular relacionados ao ODS, buscando o desenvolvimento de uma solução sustentável para o problema da contaminação de águas de consumo por arsênio.

Segundo a *Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico* (2009), a Bioeconomia engloba três elementos: os conhecimentos biotecnológicos, as biomassas renováveis e a integração desse conhecimento com as possíveis aplicações desses biomateriais. De acordo com a *Comissão Europeia* (2014), o modelo linear de produção, que engloba o descarte dos resíduos gerados no processo produtivo, deve ser substituído pelo modelo circular que gera valor para esses resíduos.

A Economia Circular busca integrar as cadeias de produção para possibilitar a permanência do material que atinge o fim do seu ciclo de vida na economia. Busca-se transformar os subprodutos industriais em matéria-prima de outro processo produtivo, reduzindo o descarte dos resíduos e a utilização de matéria-prima virgem nos processos industriais, conforme apresentado na [Figura 5 \(PARLAMENTO EUROPEU, 2021\)](#).

**Figura 5** – Modelo de produção circular



**Fonte:** Parlamento Europeu (2021).

Nesse contexto, o uso do bagaço de cana-de-açúcar para o desenvolvimento de biomateriais adsorventes está alinhado com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável presentes na Agenda 2030 das Nações Unidas que engloba aspectos da Bioeconomia e da Economia Circular. A possibilidade de aplicação desse material de fonte renovável em sistemas de tratamento de água e efluentes favorece a disponibilidade de água e contribui com os padrões sustentáveis de produção ([ONU, 2015](#)).

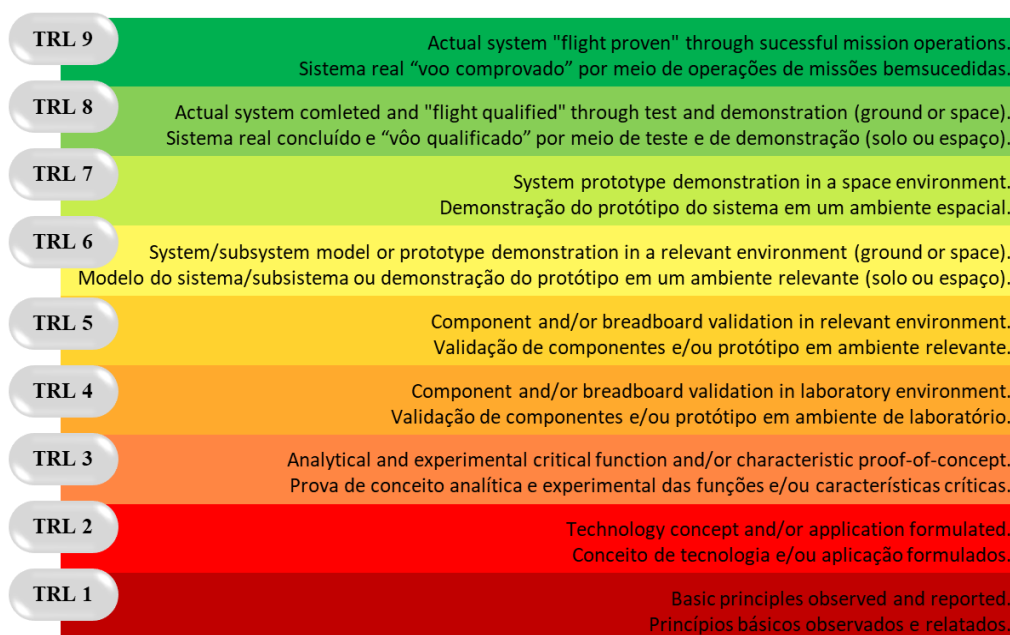
### 3.7. Escalonamento de tecnologia

A elevada disponibilidade do bagaço de cana-de-açúcar no contexto brasileiro, alinhada à capacidade técnica do GFQO para a transformação química desse resíduo industrial em produtos de elevado valor agregado, torna relevante o estudo do escalonamento tecnológico dos bioadsorventes baseado em demandas específicas do mercado, aumentando as chances de comercialização das tecnologias desenvolvidas.

### 3.7.1. Nível de prontidão tecnológica

O desenvolvimento tecnológico passa por nove níveis de maturidade. A Agência Espacial Americana [NASA \(2012\)](#) criou uma escala, chamada *Technology Readiness Level* (TRL), que representa um tipo de sistema de medição que é utilizado para identificar o nível de maturidade de determinada tecnologia, conforme demonstrado na [Figura 6](#).

**Figura 6** – Nível de Prontidão Tecnológica (*Technology Readiness Level*)



Fonte: [NASA \(2012\)](#).

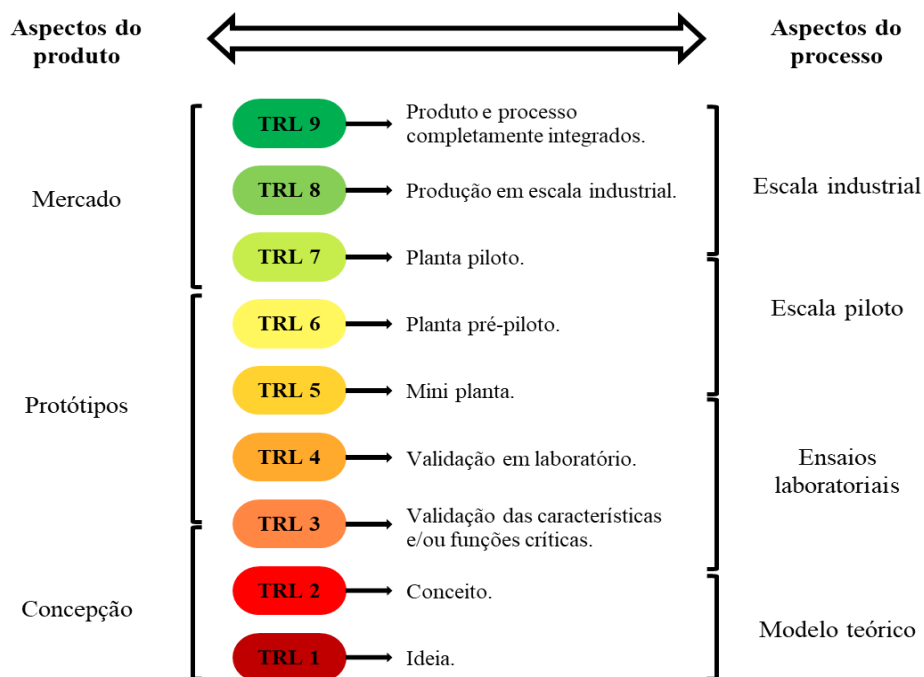
A escala TRL é chamada pela literatura brasileira de “nível de prontidão tecnológica” que representa as etapas que uma tecnologia deve percorrer ao longo de seu desenvolvimento. A escala é utilizada para classificar uma tecnologia desde o início da pesquisa científica até a aplicação da mesma no mercado.

O escalonamento tecnológico é necessário para que as tecnologias desenvolvidas no âmbito das “Ciências Duras”, também chamadas de “*Hard Science*”<sup>1</sup>, avancem no nível de maturidade. Portanto, o processo de escalonamento está diretamente ligado ao alcance de melhores níveis de prontidão tecnológica ([SILVA et al., 2019a](#); [VASCONCELLOS et al., 2020](#)).

<sup>1</sup>O termo Ciências Duras ou *Hard Science* é utilizado como referência às áreas de conhecimento que englobam as ciências da natureza, tais como engenharia, química, biologia, farmácia e física.

Diversas adaptações da escala TRL são encontradas na literatura. [Buchner et al. \(2019\)](#) correlacionam, para a Indústria Química, os níveis de prontidão tecnológica com as validações de produto e processo para o desenvolvimento de um produto químico, conforme pode-se observar na [Figura 7](#).

**Figura 7** – TRL e o desenvolvimento tecnológico na Indústria Química



**Fonte:** Adaptado de [Buchner et al. \(2019\)](#) e [FORTEC \(2019\)](#).

As pesquisas desenvolvidas nas Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs) são financiadas por órgãos de fomento como o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), as Fundações de Amparo à Pesquisa Estaduais (FAPEMIG, FAPESP, FAPERJ, entre outras) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

Apesar dos investimentos em pesquisa, os estudos relacionados ao desenvolvimento de produto e processo, necessários para a migração das tecnologias para o mercado, encontram-se no chamado “vale da morte”, representado pelos níveis 4 a 6 da escala TRL ([LEITE; et al., 2019](#)). O “vale da morte” representa a fase do desenvolvimento tecnológico, cujo desafio está relacionado ao escalonamento das tecnologias, principalmente no que se refere à falta de investimento ([SILVA et al., 2019a](#)).

Os desafios encontrados nessa fase compreendem a necessidade de desenvolver e testar protótipos, aplicar a tecnologia no mercado, buscar parcerias e aumentar a escala

de produção. Além disso, as atividades relacionadas ao escalonamento muitas vezes não se enquadram no critério de ineditismo dos órgãos de fomento para o desenvolvimento de dissertações e teses acadêmicas, dificultando a continuidade do desenvolvimento tecnológico.

### 3.7.2. Etapas do processo de escalonamento tecnológico

Segundo [Silva et al. \(2019\)](#), o processo de escalonamento das tecnologias é dividido em quatro etapas, onde cada etapa serve de aprendizado para a etapa seguinte. A etapa 1 representa a pesquisa, a etapa 2 consiste no desenvolvimento de produto, a etapa 3 possui como foco o desenvolvimento de processo e a etapa 4 é destinada para o desenvolvimento de uma planta piloto, conforme esquema ilustrado na [Figura 8 \(SILVA et al., 2019a; VASCONCELLOS et al., 2020\)](#).

Durante o processo de escalonamento tecnológico, é necessário que haja uma reflexão contínua sobre a adequação do processo produtivo da tecnologia e sua viabilidade em larga escala. Além disso, os atributos do problema identificado devem nortear o desenvolvimento de produto ([SILVA et al., 2019](#)).

**Figura 8** – Etapas do escalonamento tecnológico



Fonte: [Vasconcellos et al. \(2020\)](#).

Deve-se levar em consideração as características do produto desenvolvido e do processo realizado, em cada etapa do escalonamento. Dada a complexidade das atividades e a necessidade de utilização de diversas áreas do conhecimento ao longo do desenvolvimento tecnológico, recomenda-se que a equipe de trabalho envolvida no processo de escalonamento possua formação multidisciplinar e habilidades complementares ([SILVA et al., 2019a; VASCONCELLOS et al., 2020](#)).

### 3.7.3. Etapa 1: a pesquisa científica

A primeira etapa caracteriza-se pelo início da atividade de pesquisa e requer uma análise do estado da arte, comumente realizada por meio do levantamento dos artigos e patentes relevantes para o trabalho em bases de dados e, para isso, pode-se utilizar

ferramentas de bibliometria e patentometria. Nessa etapa, o conceito teórico da pesquisa deve ser validado e a proteção da propriedade intelectual avaliada (SILVA *et al.*, 2019a; VASCONCELLOS *et al.*, 2020).

Após a comprovação teórica da ideia, são realizados experimentos laboratoriais para a produção do material e posterior caracterização. Nessa etapa, utiliza-se pequena quantidade de insumos, normalmente em miligramas ou gramas para validação da POC 1. Além disso, deve-se realizar um estudo simplificado (prospectivo) de viabilidade técnica, econômica e ambiental para dar uma visão geral da possibilidade de alcance do mercado. Devem ser determinados, por exemplo, os custos de produção da tecnologia, as tecnologias concorrentes e se há no mercado equipamentos industriais que possam substituir os materiais de laboratório (SILVA *et al.*, 2019a; VASCONCELLOS *et al.*, 2020).

#### 3.7.4. Etapa 2: o desenvolvimento de produto

A segunda etapa possui o foco no desenvolvimento de produto. A produção do material em laboratório deve ser realizada com reagentes comerciais e deve-se verificar se houve alterações na eficiência e eficácia da tecnologia, quando comparada com a primeira etapa. Com relação ao processo, deve-se otimizar o processo de produção da tecnologia e identificar a possibilidade de ganhos no aumento de escala (SILVA *et al.*, 2019a; VASCONCELLOS *et al.*, 2020).

Nessa etapa, devem ser realizados testes de funcionalidades como evidência de que a tecnologia é capaz de resolver um problema real do mercado. A validação da Prova de Conceito 2 (POC 2), pode ser realizada com protótipos em laboratórios ou sistemas piloto que utilizem em menor escala as mesmas condições dos sistemas reais (VASCONCELLOS *et al.*, 2020).

A aplicação de um Produto Mínimo Viável (*Minimum Viable Product*, MVP) em um cliente potencial possibilita adequar a tecnologia à realidade dos usuários, o que torna o desenvolvimento tecnológico mais promissor. Como resultado da aplicação do MVP, é desejável que os usuários tenham interesse na compra da tecnologia ou na participação dos próximos passos do desenvolvimento.

Na execução da etapa 2, há um aumento de escala do processo em laboratório, observam-se as quantidades de insumos utilizados, o tempo de cada etapa do processo e as características do resíduo obtido para fins de comparação com as produções anteriores

mas, apesar da produção em maiores quantidades, é comum que os valores continuem sendo mensurados em miligramas ou gramas (SILVA *et al.*, 2019a; VASCONCELLOS *et al.*, 2020).

Para a realização do estudo de viabilidade técnica e econômica da etapa de desenvolvimento de produto, é necessário estimar os custos de produção da tecnologia, levando-se em consideração as condições mais próximas de um processo industrial. Para isso, deve-se mapear o processo e buscar ou estimar, com base no mercado, os custos da matéria-prima, dos reagentes, de energia, de pessoal, dentre outros, necessários para a operação em maior escala (SILVA *et al.*, 2019a; VASCONCELLOS *et al.*, 2020).

Antes de se avançar para a etapa 3, é necessário que seja realizada uma análise do mercado. Essa análise engloba o levantamento dos potenciais clientes da tecnologia desenvolvida e a comparação dos custos com os ganhos gerados pela aplicação da mesma. Além disso, deve-se mapear as tecnologias concorrentes e comparar o preço de mercado dessas soluções com o custo do material desenvolvido (SILVA *et al.*, 2019a).

As barreiras de entrada nesse mercado, a regulamentação aplicável, o contexto social e as questões ambientais envolvidas no processo e no ciclo de vida da tecnologia também devem ser levadas em consideração. Essa avaliação mercadológica é fundamental para o avanço no processo de escalonamento, uma vez que a etapa seguinte envolve investimentos para o aumento de produção da tecnologia.

#### 3.7.5. Etapa 3: o desenvolvimento de processo

A terceira etapa do processo de escalonamento está ligada ao desenvolvimento de processo. O sistema de produção da tecnologia deve ser desenvolvido de modo similar às operações unitárias da indústria, os materiais de laboratórios são substituídos por máquinas com as características mais próximas das industriais, e é comum a substituição de materiais, por exemplo, a troca de um balão de vidro por um reator e do agitador magnético pelo mecânico (SILVA *et al.*, 2019a).

Nessa etapa, são construídos sistemas pré-piloto, onde os parâmetros do processo são ajustados e otimizados, buscando-se aumentar o rendimento dos produtos obtidos e reduzir as quantidades dos insumos e resíduos. As principais questões relacionadas à regulação devem estar mapeadas e o impacto ambiental devidamente mitigado.

Deve-se ter conhecimento sobre a necessidade de autorizações especiais para a obtenção dos insumos, de modo que o uso desses materiais não seja um problema para a



produção em maior escala. Além disso, é desejável que os resíduos sólidos e os efluentes gerados na produção da tecnologia possam ser recuperados, possibilitando a redução do descarte dos mesmos (SILVA *et al.*, 2019a; VASCONCELLOS *et al.*, 2020).

Após a validação da POC 3 (prova de conceito de processo) e a produção da tecnologia em maiores quantidades, gramas ou quilogramas, o produto é testado e os resultados obtidos são comparados com o desempenho da tecnologia nas etapas anteriores. Até a etapa 3, grande parte das tecnologias são desenvolvidas em laboratório (SILVA *et al.*, 2019a; VASCONCELLOS *et al.*, 2020).

Ao longo do processo de escalonamento é comum que sejam observadas mudanças nas características do produto, sendo assim, os parâmetros críticos do processo, que influenciam na qualidade do produto final, devem ser identificados e acompanhados com maior atenção. Para que o processo de escalonamento continue, é necessário que todas as questões levantadas até esta etapa sejam validadas e, portanto, muitas vezes, são formadas parcerias estratégicas para o codesenvolvimento da etapa 4 (SILVA *et al.*, 2019a).

#### 3.7.6. Etapa 4: o desenvolvimento da planta piloto

A quarta e última etapa do processo de escalonamento tecnológico consiste no desenvolvimento de uma planta piloto e na validação da Prova de Conceito 4 (POC 4). A execução de um projeto de planta piloto requer investimento que deve ser justificado com a existência de clientes interessados na tecnologia desenvolvida e a validação do modelo de negócio específico para a comercialização do produto desenvolvido (SILVA *et al.*, 2019a; VASCONCELLOS *et al.*, 2020).

Os custos relacionados à aquisição de bens de capital ou *capital expenditure* (CAPEX), tais como máquinas e equipamentos, necessários para a montagem de uma unidade industrial, bem como as despesas operacionais ou *operational expenditure* (OPEX), tais como salários, espaço físico, energia e insumos, devem ser considerados na avaliação da viabilidade do modelo de negócio proposto (VASCONCELLOS *et al.*, 2020).

Dentre os objetivos da POC 4, destacam-se o alcance de uma escala mais próxima da industrial, a validação da infraestrutura do processo produtivo e das operações unitárias utilizadas na planta. As etapas anteriores ao desenvolvimento da planta piloto são fundamentais para subsidiar a POC 4, uma vez que os aprendizados relacionados ao

desenvolvimento de produto e processo, adquiridos durante o aumento gradativo de escala, reduzem os riscos relacionados à produção na planta piloto (SILVA *et al.*, 2019a).

### 3.7.7. Transferência de tecnologia para o mercado

A transferência de uma tecnologia pode se tornar interessante para uma empresa consolidada ou para uma *startup*, uma vez que o produto seja reconhecido como solução para determinada demanda do mercado e a viabilidade de sua produção em escala industrial seja validada. O licenciamento de patente ou do conhecimento tácito (*know-how*) de pesquisadores são práticas conhecidas e utilizadas nas ICTs para a exploração das tecnologias por empresas no mercado (SPEZIALI, 2020).

Ao licenciar uma tecnologia, os direitos adquiridos pelos inventores no momento da proteção da propriedade intelectual passam para o licenciante, nas condições pré-estabelecidas em negociação entre as partes. No caso das *startups*, é possível que os próprios inventores sejam os idealizadores do modelo de negócio criado para explorar a tecnologia (SPEZIALI, 2020).

O meio jurídico para a realização da transferência tecnológica é o contrato de licenciamento que estabelece o pagamento de *royalties* aos inventores. No âmbito das universidades, as patentes depositadas possuem como titular a própria ICT, entretanto, os benefícios gerados pela transferência da tecnologia são divididos entre o Núcleo de Inovação Tecnológica (NIT), os inventores e o laboratório envolvido no desenvolvimento tecnológico (SPEZIALI, 2020).

## 3.8. Propriedade intelectual nas ICTs

As invenções desenvolvidas no âmbito das ICTs que possuem potencial de serem exploradas economicamente devem ser avaliadas, com o auxílio do NIT, para fins de proteção intelectual. A partir dessa avaliação, pode-se determinar o melhor momento para um pedido de patente que deve possuir como objetivo final o licenciamento em um momento oportuno.

A propriedade intelectual é um ativo intangível. De acordo com a Organização Mundial de Propriedade Intelectual (OMPI), esse tipo de propriedade é fruto da inteligência humana, criatividade e imaginação (OMPI, 2014). A proteção por patente é uma das várias formas de proteção de uma invenção, fazendo parte da subdivisão Propriedade Industrial, que no Brasil é regulamentada pela Lei Nº 9.279 de 1996 (SPEZIALI, 2020).

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) é o escritório que analisa as patentes depositadas no Brasil. É importante ressaltar que o depósito de uma patente resguarda os inventores na jurisdição em que a mesma foi depositada, ou seja, os direitos obtidos pelo depósito de uma patente no INPI não impedem que haja a exploração da tecnologia fora do Brasil (OMPI, 2014). Para que uma invenção seja patenteável, é necessário que sejam atendidos os requisitos: novidade, atividade inventiva e aplicação industrial (BRASIL, 1996).

O requisito novidade é alcançado uma vez que a invenção não seja conhecida, sendo necessário realizar uma busca por anterioridades e comprovar a ausência das características do produto ou processo reivindicado nas diversas bases de dados; já a atividade inventiva tem relação com a não-obviedade, ou seja, a invenção não pode ser óbvia para uma pessoa com habilidades no campo do conhecimento dessa invenção; por fim, a aplicação industrial é reconhecida quando a invenção pode ser utilizada ou produzida por algum tipo de indústria (BRASIL, 1996; OMPI, 2014; SPEZIALI, 2020).

Um documento de patente possui algumas divisões, destacando-se a lista de reivindicações que consiste das informações da tecnologia que de fato serão protegidas; e o relatório descritivo que, dentre outras informações, contempla o campo da invenção, o estado da técnica e as descrições da invenção (SPEZIALI, 2020). Para os países membros do *Patent Cooperation Treaty* (PCT), há a possibilidade de realizar o depósito internacional de patente. O depósito internacional fornece um período de 12 meses, contados da data de prioridade (pedido mais antigo ou internacional), para o depósito da patente nos Estados vinculados ao tratado (OMPI, 2014).

É importante ressaltar que cada país está vinculado a um escritório de patente regional e que existem peculiaridades a serem seguidas pelos examinadores. Por exemplo, é possível realizar o depósito de uma patente em alguns escritórios, mesmo que a invenção tenha sido divulgada previamente pelos próprios inventores (OMPI, 2014).

No Brasil e nos EUA, o “período de graça” ocorre em até 12 meses da divulgação, enquanto o escritório japonês utiliza um período de seis meses e o europeu não permite tal divulgação (BRASIL, 1996; OMPI, 2014).

Ao ser depositada no INPI, a patente passa por um período de sigilo de 18 meses contados da data de depósito. Após esse período, as informações contidas na patente tornam-se públicas, estando seu uso comercial vinculado à autorização do detentor da propriedade industrial, por um período de vinte anos, contados da data de depósito da

patente, ou enquanto a mesma estiver aguardando a análise pelo INPI (BRASIL, 1996; SPEZIALI, 2020). A despeito da necessidade da autorização do detentor da patente, algumas tecnologias devem ser objeto de avaliação por órgãos reguladores, tais como ANVISA, INMETRO, MAPA, entre outros, para que seja possível sua comercialização.

Segundo Speziali (2020), embora não seja um tipo de Propriedade Intelectual, o segredo de negócio é uma alternativa para uma empresa não divulgar em uma patente informações relacionadas ao seu processo ou produto. Nesse caso, são construídos mecanismos jurídicos para manutenção do sigilo das informações e garantia de que o segredo de negócio não seja revelado. As principais diferenças entre patente e segredo de negócio são mostradas na Tabela 2 (SPEZIALI, 2020).

**Tabela 2** – Diferenças entre patente e segredo de negócio

Patente	Segredo de Negócios
Validade de 20 anos a partir do depósito.	Sem prazo de validade definido.
Custos de depósito da patente e manutenção desta nos escritórios de patentes escolhidos.	Custos indiretos para manutenção do segredo. Em alguns casos, esse custo poderá ser próximo de zero ou zero propriamente dito.
A patente é um documento público contendo todas as informações sobre a tecnologia.	O segredo de negócios mantém o monopólio das informações acerca da invenção.
O documento de patente é uma ferramenta eficiente para provar litígios.	Elevado custo com processos em caso de litígios, vazamentos de informações etc.
Uma patente precisa ter os requisitos de patenteabilidade: aplicação industrial, novidade e atividade inventiva.	Segredo de negócios não precisa necessariamente apresentar os requisitos de patenteabilidade. Para ser considerada uma invenção útil, é frequente a necessidade de uma aplicação industrial e novidade, porém a atividade inventiva se torna fator opcional.
Mais fácil de quantificar o potencial inovador de uma empresa ou de um grupo de inventores.	Difícil de quantificar o potencial inovador dos donos do segredo industrial.
O Estado concede o direito de exclusividade sobre a invenção descrita na patente.	Qualquer um que descubra, por boa fé, o segredo de negócios poderá comercializar livremente a tecnologia e poderá, em alguns casos, até mesmo solicitar uma proteção por patente.

**Fonte:** Speziali (2020).

Segundo Speziali (2020), no processo de invenção, o conhecimento tácito e especializado em uma determinada área pode ser denominado “*know-how*”. Apesar de

poder envolver a confidencialidade de informações, o *know-how* difere do segredo de negócio pois está relacionado ao conhecimento intrínseco de um especialista ou um grupo de especialistas e na sua capacidade de solucionar algum tipo de problema complexo (SPEZIALI, 2020).

Na indústria química, por exemplo, o que vai caracterizar o *know-how* não é a obtenção dos parâmetros de determinada reação, mas a interpretação e a capacidade de tratar esses parâmetros, de modo que as decisões sejam tomadas para melhorar um processo ou resolver um problema (SPEZIALI, 2020).

A escolha entre proteger uma tecnologia ou manter um segredo de negócio é uma decisão estratégica: dependendo da característica da tecnologia desenvolvida, é possível que ambas as possibilidades sejam combinadas, o que mitigará a possibilidade de que, após a vigência da patente, outras empresas desfrutem comercialmente da tecnologia (SPEZIALI, 2020).

### 3.9. Inovação no Brasil

O conceito de invenção não deve ser confundido com o de inovação. Segundo Silva *et al.* (2019), a invenção é “resultado de uma atividade criativa/tecnológica que tem por objetivo resolver um problema”. Por outro lado, a inovação ocorre na medida em que uma nova ideia é explorada com sucesso no processo de desenvolvimento tecnológico e, conseqüentemente, uma invenção se transforma em uma inovação a partir do momento em que a tecnologia passa a ser comercializada pelo mercado (BOER; DURING, 2001; SILVA *et al.*, 2019a; VASCONCELLOS *et al.*, 2020).

Segundo Lazerte (1989), os projetos de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) das ICTs podem gerar soluções para uma “dor” do mercado, processo denominado *Market Pull* ou podem estar relacionados com um tema em alta no meio científico, sem conexão com o mercado, denominado *Technology Push*. Ambos os tipos de desenvolvimento tecnológico trazem benefícios para o meio acadêmico e para a sociedade, entretanto, a combinação desses processos favorece o surgimento de modelos de negócios inovadores (LAZERTE, 1989).

O Brasil ocupou a 11ª posição no ranking internacional de publicação de artigos científicos divulgado pela *National Science Foundation* (NSF, EUA) no ano de 2018 (NSF, 2019). Segundo a OMPI, no que diz respeito à inovação, o Brasil ocupou a 57ª posição no Índice Global de Inovação (IGI) para o ano de 2021. O país avançou cinco

posições no ranking, quando comparado ao ano de 2020, alcançando sua melhor classificação desde 2012 (WIPO, 2021).

O desempenho brasileiro foi superior ao esperado para o ano de 2021, considerando seu nível de desenvolvimento econômico. Avaliando os pilares que compõem o IGI separadamente, o Brasil ocupa a 34ª posição no quesito “sofisticação empresarial” e a 48ª posição em “capital humano e pesquisa” (WIPO, 2021).

Na América Latina, apenas Chile (53ª posição), México (55ª posição), Costa Rica (56ª posição) e Brasil (57ª posição) encontram-se entre os 60 países mais bem colocados no índice de inovação. O Brasil possui importantes polos de ciência e tecnologia, sendo a única economia da região com gastos em P&D superiores a 1 % do PIB, gastos comparáveis com os de países da Europa como Croácia e Luxemburgo (WIPO, 2021).

Nota-se um avanço brasileiro impulsionado pelos investimentos em inovação (público e privado) e pela produção científica. A integração das universidades com a indústria vem sendo pauta de diálogos que estimulam a criação de políticas públicas voltadas para as atividades de inovação (GIMEZEZ; BONACELLI; BAMBINI, 2018).

Apesar da Lei de Inovação ter sido publicada em 2004, somente em 2015, a Constituição Federal, por meio da Emenda Constitucional Nº 85, trouxe pela primeira vez dispositivos que visam promover as atividades de inovação (BRASIL, 1988). As normas constitucionais foram complementadas em 2016 pelo Marco Legal da Inovação e, posteriormente, em 2018, houve a regulamentação da norma infralegal.

O Marco Legal de Ciência, Tecnologia e Inovação, formalizado pela Lei Nº 13.243 de 2016, trouxe certa flexibilidade para a atuação das universidades e, principalmente, para o envolvimento dos pesquisadores em atividades de co-desenvolvimento com os diversos atores do mercado em regime de cooperação. Dessa forma, houve a criação de condições jurídicas para trabalho em rede, com a possibilidade de exploração da inovação aberta, envolvendo empresas, universidades e o governo, formando o chamado Tripé da Inovação (BRASIL, 2016a).

A normativa visou também o desenvolvimento social, ao promover a cultura da inovação dentro das universidades. Conseqüentemente, a comunidade acadêmica passou a ter novas oportunidades de inserção no mercado por meio, por exemplo, da criação de *startups*. A promoção da cultura inovadora, por sua vez, influencia positivamente a oferta

de emprego e o estabelecimento de negócios regionalmente próximos aos centros de inovação (BRASIL, 2016a).

Com o objetivo de regular os dispositivos do Marco Legal, o Decreto Nº 9.283/2018 trouxe um conjunto de regras e orientações para as ICTs, das quais destacam-se a possibilidade do NIT possuir personalidade jurídica própria; de compartilhamento dos equipamentos e laboratórios por meio da formalização de instrumentos jurídicos, tais como termo de outorga, acordo de parceria ou convênios; da participação dos pesquisadores no quadro societário de empresas criadas para fins de exploração econômica das tecnologias desenvolvidas no âmbito da universidade, mesmo que possua vínculo de exclusividade com a Instituição; da transferência de tecnologia para o setor privado com o objetivo de explorar comercialmente a solução; de alterações orçamentárias do valor fixado para as atividades de ciência, tecnologia e inovação, sem prévia autorização legislativa (BRASIL, 2018).

Apesar do arcabouço legislativo, percebem-se diversas fraquezas no Sistema Nacional de Inovação brasileiro que estão relacionadas à falta de integração do sistema político com o ecossistema de inovação e ao descompasso entre as políticas públicas e ações necessárias para fomentar a inovação nas ICTs (GIMEZEZ; BONACELLI; BAMBINI, 2018).

### 3.9.1. O papel das universidades no ecossistema brasileiro de inovação

De acordo com o ranking universitário divulgado em 2019 pelo Datafolha, as universidades que obtiveram as cinco melhores colocações foram: Universidade de São Paulo (USP) - 1º lugar, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) - 2º lugar, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - 3º lugar, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) - 4º lugar e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) - 5º lugar (DATAFOLHA, 2019).

Já a UFOP ocupou a 39ª colocação nesse ranking universitário (DATAFOLHA, 2019). Dentre os fatores que foram levados em consideração para o ranqueamento estão presentes a inovação e as relações com o mercado. As universidades melhor colocadas participam do ecossistema de inovação com uma estrutura que engloba incubadora de empresas, empresas júnior, parque tecnológico e núcleo de inovação tecnológica. Cada parte do ecossistema possui um papel relevante no processo de inovação.



As incubadoras de empresas atuam no processo de criação de novos empreendimentos no âmbito da universidade, dispondo de uma estrutura física para localização das empresas nascentes, fornecendo apoio para definição do modelo de negócio e conhecimento jurídico, contábil e administrativo para auxiliar a empresa no período inicial de atuação, além de promover o desenvolvimento das características empreendedoras da equipe envolvida (MANTOVANI *et al.*, 2006).

O NIT, por sua vez, atua na gestão da política de inovação das universidades, acompanha o processo de transformação das invenções em inovação tecnológica, é responsável pela gestão da propriedade intelectual e pode auxiliar no processo de valoração e transferência de tecnologia por meio de parcerias com empresas (CASTRO; SOUZA, 2012).

Já os parques tecnológicos são responsáveis pela interação entre a universidade e a indústria por meio de projetos de cooperação que conectam as soluções desenvolvidas pelos grupos de pesquisas das universidades com as necessidades da indústria (COLLARINO; TORKOMIAN, 2015). Espera-se que as interações realizadas nos parques tecnológicos contribuam para a formação de novos empreendimentos oriundos da academia.

As empresas juniores são formalizadas como associação civil e vinculadas a uma instituição de ensino superior. As atividades são geridas por alunos de graduação e vinculadas ao conteúdo dos cursos registrados no estatuto (BRASIL, 2016b; GIBERTINI, 2020). Diferentes das empresas tradicionais que possuem como principal objetivo auferir lucro, as empresas juniores possuem como finalidade a capacitação dos participantes para o mercado de trabalho por meio do desenvolvimento de habilidades e competências empreendedoras (BRASIL, 2016b; GIBERTINI, 2020).

No âmbito nacional, são exemplos de instituições envolvidas em ações de inovação a Associação Nacional de Entidades Promotoras de Empreendimentos Inovadores (ANPROTEC), a Empresa de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII), a Associação Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento das Empresas Inovadoras (ANPEI), o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE).

Esses atores do ecossistema possuem iniciativas que conectam as universidades com as grandes indústrias, de modo que as soluções desenvolvidas avancem em nível de maturidade tecnológica e, sejam, de fato, colocadas no mercado. As ações no ecossistema



são realizadas em rede, sendo, cada parte, peça fundamental para o desenvolvimento tecnológico. No entanto, as ICTs que não possuem uma estrutura adequada para esses atores do ecossistema lidam com uma dificuldade ainda maior para entender as interações necessárias no processo de inovação.

As iniciativas de pré-aceleração e aceleração de *startup* são fundamentais para que ocorra uma interação efetiva com o mercado no ecossistema. Os programas de inovação oferecem capacitação para os pesquisadores empreendedores, nas habilidades necessárias para interação com o mercado, auxiliam na elaboração de modelos de negócio, além de buscarem recursos para o escalonamento tecnológico. Os programas Startup Weekend, Catalisa, Lemonade, Ideiaz, OUT Lab, Biostartup Lab, Escale-se e FIEMG Lab são exemplos de programas de aceleração e pré-aceleração.

O ecossistema de inovação favorece a integração entre as universidades e as empresas. O desenvolvimento tecnológico nas universidades, orientado para os problemas encontrados no mercado, contribui para que as ICTs funcionem como um catalisador do processo de inovação brasileiro.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

O bagaço de cana-de-açúcar utilizado no presente estudo foi fornecido por um alambique de Conselheiro Lafaiete, Minas Gerais, Brasil. Os reagentes utilizados para modificação química, epicloridrina e trietilamina, foram adquiridos da Sigma-Aldrich (Brasil) e CRQ, respectivamente. *N,N*-dimetilformamida (DMF) e éter dietílico foram adquiridos da ACS (Brasil); etanol 95 % foi adquirido da EMFAL (Brasil); ácido clorídrico foi adquirido da Quimidrol (Brasil); cloreto de cálcio anidro foi adquirido da Alphatec (Brasil); acetona foi adquirida da Synth (Brasil); arsenato de sódio heptahidratado, ciclohexano e hidróxido de sódio em micropérolas foram adquiridos da Neon (Brasil); papel de filtro quantitativo faixa preta (JP-41, 12,5 cm de diâmetro) foi adquirido da JProLab (Brasil).

### 4.2. Purificação dos solventes e reagentes

O solvente orgânico DMF foi previamente tratado com peneira molecular 3 Å ativada em mufla a 150 °C por 2 h. Além disso, a trietilamina foi mantida sob refluxo por 3 h em um sistema composto por um balão de fundo redondo com micropérolas de NaOH e condensador de refluxo contendo um bulbo de vidro preenchido com cloreto de cálcio anidro. Em seguida, a trietilamina foi destilada para posterior utilização nas sínteses.

### 4.3. Preparo do bagaço de cana-de-açúcar

A moagem do bagaço de cana-de-açúcar foi realizada em moinho de facas (De Leo, modelo tipo Willey) e o peneiramento a seco foi realizado em um agitador eletromagnético (Bertel, modelo 2723) com peneiras de 32 (0,595 mm), 60 (0,250 mm), 100 (0,149 mm), 200 mesh (0,074 mm) e fundo. A fração de 100 mesh do bagaço de cana-de-açúcar foi lavada por 60 min com água, sob agitação constante a 70 °C. Para isso, utilizou-se um béquer de 2 L e água ultrapura produzida por um ultrapurificador de água (Millipore, modelo Milli-Q Simplicity®) para o bagaço usado nas sínteses realizadas em balão de vidro. Já a lavagem do bagaço usado na síntese em maior escala foi realizada no reator de aço inoxidável 304 com agitação mecânica com impulsor de âncora, com água filtrada em filtro de carvão ativado para remoção de particulados. Durante a etapa de filtração sob pressão reduzida, o bagaço foi lavado com etanol 95 % e submetido à secagem em estufa sob pressão reduzida a 90 °C por 60 min.

#### 4.4. Modificação do bagaço de cana-de-açúcar em escala de laboratório

Para a modificação química do bagaço de cana-de-açúcar em pequena escala, utilizou-se um sistema constituído de balão bitubulado de fundo redondo conectado a um funil de adição de líquido com equalizador e a um condensador de bolas conectado a um bulbo de vidro contendo cloreto de cálcio anidro em pó (agente secante). As vidrarias utilizadas e o bagaço de cana foram previamente lavados e secos em estufa a 100 °C por 1 h (FANEM, modelo 515 C).

Para cada grama de bagaço de cana-de-açúcar de granulometria 100 mesh (0,149 mm) foram adicionados ao balão de fundo redondo 20 mL de DMF anidra e 12,8 mL de epicloridrina. A suspensão foi aquecida em banho de óleo, colocado sob uma chapa aquecedora (Corning®, modelo PC 420D), a 100 °C sob agitação magnética de 400 rpm. Após 30 min, para cada grama de bagaço de cana, adicionou-se lentamente 22 mL de trietilamina ao balão, por meio de um funil de adição de líquido. Após a adição da trietilamina, a reação permaneceu nas mesmas condições de temperatura e agitação por mais 2 h. Em seguida, após o término da reação, a agitação foi desligada e o sistema foi retirado do banho de óleo para resfriar por 5 min. Então, a suspensão foi transferida para um funil de Büchner de placa porosa de 250 mL (porosidade 2) e lavada sob pressão reduzida com etanol 95 %, água destilada, solução de ácido clorídrico (0,1 mol L<sup>-1</sup>), água destilada, etanol 95 % e éter dietílico. O BBA ainda úmido com éter dietílico foi transferido para uma placa de Petri e seco em estufa a 35 °C sob pressão reduzida por 24 h.

#### 4.5. Modificação do bagaço de cana-de-açúcar em escala piloto

A modificação química do bagaço de cana-de-açúcar em maior escala foi realizada em reator de aço inoxidável 304 de 16 litros (Marconi, modelo MA502/16I/AGT). O reator possui conexão para um sistema de condensação composto por um condensador de bolas conectado a um bulbo de vidro contendo cloreto de cálcio em pó (agente secante) e é equipado com dispositivos de adição de sólidos e líquidos.

O bagaço de cana e os reagentes utilizados foram adicionados conforme descrito na [seção 4.4](#). A suspensão foi aquecida por resistência externa à parede do vaso reator a 100 °C sob agitação mecânica com impulsor de âncora a 120 rpm. Após o tempo de reação, o aquecimento foi desligado e o resfriamento foi realizado com água corrente a temperatura ambiente por um sistema de serpentina até alcançar a temperatura de 30 °C. Em seguida, o bioadsorvente produzido e o efluente gerado foram removidos pelo fundo do reator, sendo coletados em um béquer de 5 litros.

A suspensão foi transferida para um funil de Büchner de placa porosa de 1000 mL (porosidade 2) e lavada sob pressão reduzida com etanol 95 %, água destilada, solução de ácido clorídrico (0,1 mol L<sup>-1</sup>), água destilada, etanol 95 % e éter dietílico. O BBA ainda úmido com éter dietílico foi transferido para uma placa de Petri e seco em estufa a 35 °C sob pressão reduzida por 24 h.

#### 4.6. Caracterização do bioadsorvente

Após as sínteses, o bioadsorvente foi caracterizado por meio das seguintes análises: ganho de massa, espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), teor de cloro e análise elementar de C, H e N.

O ganho de massa do BAA foi determinado comparando-se a massa do bagaço de cana-de-açúcar com a massa de bioadsorvente, em base seca, por meio da [Equação \(1\)](#).

$$gm / \% = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo:

$gm$ : porcentagem de ganho de massa do material após modificação química (%);

$m_i$ : massa inicial (g) do bagaço de cana-de-açúcar;

$m_f$ : massa (g) do BAA.

Os espectros de FTIR foram obtidos em um espectrômetro (ABB Bomem, modelo MB3000) operando no modo reflexão total atenuada (ATR) com cristal de diamante ou no modo pastilha de brometo de potássio (KBr), com óptica de seleneto de zinco (SeZn), resolução do detector de 4 cm<sup>-1</sup> e 32 varreduras por amostra. Para operação no modo pastilha de KBr, foram utilizadas 2,0 ± 0,1 mg de cada amostra misturadas a 100,0 ± 0,1 mg de KBr (grau de espectroscópico). A mistura foi macerada e prensada na forma de pastilha (13 mm) em uma prensa hidráulica (Pike CrushIR, modelo 181-1110) usando seis toneladas de pressão.

O teor de cloro foi determinado por volumetria de precipitação após a combustão das amostras orgânicas pelo método de *Schöniger* ([SCHÖNIGER, 1956](#)). A análise elementar de cloro foi realizada, em duplicata, pelo Centro Analítico de Instrumentação do Instituto de Química da Universidade de São Paulo (USP). As amostras foram secas para ficarem livres de umidade antes do envio para a análise. As comparações estatísticas dos resultados foram realizadas utilizando-se os testes *F* e *t* em nível de confiança de 95%.

A análise elementar foi utilizada para a determinação da composição química do bioadsorvente pelo teor de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) contido na estrutura dos materiais. A técnica é baseada no método de *Pregl-Dumas*, em que as amostras são submetidas à combustão em uma atmosfera de oxigênio puro, sendo os gases resultantes dessa combustão quantificados em um detector de condutividade térmica (SHAH; PANSARE; MULAY, 1956). As análises foram realizadas, em duplicata, por um analisador elementar CHN modelo 2400, Serie II da marca Perkin Elmer, localizado no Centro Analítico de Instrumentação do Instituto de Química da Universidade de São Paulo (USP). As amostras foram secas em estufa a 35 °C sob pressão reduzida por 24 h para ficarem livres de umidade antes do envio para a análise. As comparações estatísticas dos resultados foram realizadas utilizando-se os testes *F* e *t* em nível de confiança de 95%.

#### **4.7. Quantificação de arsênio e dos ânions presentes nas amostras**

A quantificação de arsênio nas amostras (contaminada em laboratório, água natural e efluente) foi realizada por um espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES, marca Agilent, modelo 725) para concentrações de arsênio até 1 mg L<sup>-1</sup> e espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS, marca Agilent, modelo 8800) para concentrações de arsênio menores do que 1 mg L<sup>-1</sup>. Além disso, foi utilizado um cromatógrafo de íons (marca Metrohm, modelo 930 Compact IC Flex) equipado com uma coluna METROSEP A Supp 10-150/4.0 para quantificação dos ânions cloreto, sulfato e nitrato presentes nas amostras.

#### **4.8. Experimentos de adsorção de arsênio**

Os experimentos de adsorção de arsênio foram realizados em batelada ou em contínuo para avaliação do desempenho do material com solução contaminada em laboratório, água natural e efluente contaminados por arsênio.

A solução contaminada em laboratório foi preparada a partir do sal arsenato de sódio com água ultrapura produzida por um ultrapurificador de água (Millipore, modelo Milli-Q Simplicity®). O ajuste de pH foi realizado com soluções de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> e NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>. A água natural contaminada foi obtida em Ouro Preto, MG e o efluente foi obtido de uma mineradora de ouro com identificação protegida por confidencialidade.

##### **4.8.1. Experimentos de adsorção em batelada**

Os estudos de adsorção em batelada foram realizados em uma incubadora de agitação orbital (Tecnal, modelo TE-424). O adsorvente foi pesado em uma balança

analítica (Shimadzu, modelo Libror AEG-45SM), em frascos de vidro cilíndricos (1,8 mm de altura  $\times$  2,2 mm de diâmetro), que foram adicionados em frascos Erlenmeyer de 250 mL com 100 mL de amostra contaminada com arsênio. Após 1 h de agitação a 130 rpm, os frascos Erlenmeyer foram retirados da incubadora e a solução foi filtrada em papel de filtro JP-41 para separação das fases sólida e líquida, sendo coletada somente a fase líquida para determinação da concentração de arsênio. A cinética de adsorção foi realizada nas mesmas condições do experimento em batelada com coleta de amostras ao longo do estudo com duração de 15 h. As comparações estatísticas dos resultados foram realizadas utilizando-se os testes *F* e *t* em nível de confiança de 95%.

#### 4.8.2. Experimentos de adsorção em contínuo

Os estudos de adsorção em contínuo, em coluna de leito fixo, foram feitos com base nos procedimentos descritos e desenvolvidos por [Xavier et al. \(2018\)](#). Foram utilizadas colunas de vidro com jaqueta para circulação de fluido com diâmetro de 10 e 20 mm recheadas com 0,5 g do bioadsorvente. As extremidades das colunas foram preenchidas com esferas e lã de vidro e as amostras foram percoladas pelo leito com fluxo ascendente ou descendente, com auxílio de uma bomba peristáltica. A vazão do influente à coluna variou de 15 a 16 mL min<sup>-1</sup> e o tempo de operação de 4 a 5 h, com coleta de amostras ao longo do experimento. O controle de temperatura da coluna de leito fixo foi realizado utilizando um banho termostático com recirculação de água (Marconi, modelo MA470), a 25,0  $\pm$  0,1 °C. As comparações estatísticas dos resultados foram realizadas utilizando-se os testes *F* e *t* em nível de confiança de 95%. A capacidade de adsorção foi calculada pela área da curva de ruptura ([WORCH, 2012](#)), a partir da [Equação \(2\)](#).

$$Q / mg g^{-1} = \frac{C_0 v}{1000 m_i} \int_0^t \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right) dt \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo:

*Q*: capacidade de adsorção da coluna;

*C*<sub>0</sub>: concentração inicial (mg L<sup>-1</sup>) de adsorvato na fase fluida;

*C*<sub>t</sub>: concentração final (mg L<sup>-1</sup>) de adsorvato na fase fluida;

*m*: massa de adsorvente (g) empacotada na coluna;

*v*: vazão volumétrica (mL min<sup>-1</sup>) da fase fluida.

#### 4.8.3. Experimentos de dessorção em contínuo

A capacidade de regeneração do bioadsorvente após a sua saturação foi avaliada. Após o experimento de adsorção em contínuo, a amostra contaminada remanescente na coluna foi removida com 1 L de água destilada. Em seguida, uma solução de HNO<sub>3</sub>

(0,08 mol L<sup>-1</sup>) foi alimentada à coluna de leito fixo com a mesma vazão e tipo de fluxo (ascendente ou descendente) do experimento de adsorção correspondente. O tempo de operação variou de 180 a 260 s, com coleta de amostras ao longo do experimento. O controle de temperatura da coluna de leito fixo foi realizado utilizando um banho termostático com recirculação de água (Marconi, modelo MA470), a  $25,0 \pm 0,1$  °C.

#### 4.9. Metodologia de escalonamento

A metodologia de escalonamento de tecnologia, descrita pelo livro “Guia Prático de Escalonamento de Tecnologias”, cujo texto foi produzido por integrantes do Núcleo Praxis de Estudos Aplicados à Inovação da UFMG, tem como objetivo contribuir para o processo de inovação, apresentando as etapas do desenvolvimento tecnológico, relacionadas ao desenvolvimento de produto e processo, e a importância de sua integração com as necessidades do mercado. De acordo com os autores do livro, “no desenvolvimento de tecnologias, quanto mais cedo aspectos de mercado são considerados, mais chances de sucesso teremos ao levar a tecnologia à sociedade” (SILVA *et al.*, 2019a). Esse conceito é confirmado pelos estudos de caso apresentados na obra, os quais relatam o processo de escalonamento de diversas tecnologias.

As tecnologias presentes na plataforma tecnológica do GFQO foram desenvolvidas considerando as demandas apresentadas pela literatura para o tratamento de água e efluente. Visando contribuir para o processo de migração de tecnologias para o mercado, o presente trabalho foi desenvolvido com base na metodologia acima citada. O ponto de partida foi a identificação das demandas de mercado para a aplicação de uma das tecnologias adsorventes presente na plataforma tecnológica do GFQO. Os estudos foram baseados nas demandas relacionadas ao tratamento de água de abastecimento contaminada com arsênio, bem como à remoção de arsênio de efluentes da mineração de ouro. Foi realizado um estudo de pré-escalonamento com o objetivo de validar os aspectos relacionados ao desenvolvimento de produto e processo.

O estudo evidenciou os gargalos técnicos e econômicos que precisam ser trabalhados para o aumento de escala. A partir dos experimentos realizados em laboratório e da comparação do desempenho do BAA com as tecnologias comerciais concorrentes, os protótipos foram desenvolvidos para testes em laboratório, visando a aplicação do MVP no cliente para validação do sistema.

Foram mapeadas as atividades necessárias para a obtenção da tecnologia em laboratório – pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar e síntese do BAA – e identificadas as etapas críticas de produção. O programa computacional *Bizagi Studio*

(versão 3.6.0.044) foi utilizado como ferramenta tecnológica para a modelagem do processo produtivo do bioadsorvente. Foram descritos os equipamentos, materiais, reagentes e o tempo necessário em cada atividade do processo. Após o mapeamento, identificaram-se as possíveis modificações de processo para redução do investimento do aumento de escala e do custo de produção.

Com o objetivo de avaliar o custo dos reagentes e solventes necessários para o preparo do bioadsorvente, foram obtidos os valores a partir de consultas ao *website* da empresa Sigma-Aldrich e por meio de cotações solicitadas para as empresas Quimidrol, ACS, CRQ e EMFAL (MERCK, 2021). Visando avaliar os valores de importação dos reagentes e solventes foi consultado o *website* Comex Stat do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviço e, na ausência de informações, os valores de importação foram obtidos no *website* Alibaba (ALIBABA, 2021; GOVERNO FEDERAL, 2021).

Os fabricantes dos produtos químicos de uso industrial produzidos no Brasil, necessários para a obtenção da tecnologia, foram identificados na ferramenta gratuita de busca online *Brazilian Chemicals*. O *website* é atualizado pela Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM, 2021). Foram avaliadas as alternativas sustentáveis para a produção dos produtos químicos empregados no processo de obtenção do BAA. Além disso, foi verificada a necessidade de licenças especiais da Polícia Federal e do Exército para uso e importação dos produtos químicos utilizados no processo de obtenção da tecnologia, bem como a legislação aplicável em cada situação.

A partir do fluxograma e da descrição dos processos, foram identificados os equipamentos necessários para produção do bioadsorvente em maior escala. As características similares ao processo industrial foram levadas em consideração para composição da planta piloto de laboratório. Foram avaliadas as possibilidades de destinação do efluente gerado na produção do bioadsorvente. O efluente não recuperado no processo foi destinado de acordo com a Resolução CONAMA N° 430 de 2011 que dispõe sobre os padrões de lançamento de efluentes industriais (CONAMA, 2011).

#### **4.10. Análise de viabilidade econômico-financeira**

O mercado total (*Total Available Market*, TAM) e o mercado alcançável (*Serviceable Available Market*, SAM) foram definidos com base nos relatos da literatura do número total de pessoas no mundo e na América Latina, respectivamente, que consomem água contaminada com arsênio fora dos padrões de potabilidade determinados pela OMS (BUNDSCHUH *et al.*, 2022; KUMAR *et al.*, 2019). O mercado acessível (*Serviceable Obtainable Market*, SOM) foi determinado pelo número de pessoas que a



planta piloto do GFQO é capaz de alcançar após cinco anos de operação. Para o número de famílias alcançadas considerou-se a quantidade média de pessoas por família, definida pela [Secretaria Nacional da Família \(2021\)](#).

A produção máxima foi definida com base na quantidade de bioadsorvente produzido com carregamento de 70 % do volume total do reator. Para o cálculo da produção máxima diária de dispositivos, considerou-se a carga horária e o número de turnos de trabalho, o número de operadores necessários para produção do bioadsorvente e montagem dos dispositivos e a quantidade de bioadsorvente utilizada em cada dispositivo. Além disso, determinou-se o número de dias de trabalho anual e a taxa de crescimento da produção para a definição do número de MVPs que seriam vendidos anualmente, chegando na produção total após os cinco anos de operação.

Foram definidos os custos dos componentes necessários para a montagem dos dispositivos, o investimento em bens de capital necessário para a montagem da planta piloto, o custo mensal de energia elétrica para produção do bioadsorvente e montagem dos dispositivos, bem como os custos relacionados à estrutura administrativa e comercial necessária para manutenção do modelo de negócio.

O cálculo do imposto a ser recolhido foi realizado com base no Anexo II (indústria) do Simples Nacional ([BRASIL, 2006](#)). O regime tributário utiliza o faturamento mensal como base de cálculo, sendo a alíquota efetiva calculada a partir da [Equação \(3\)](#).

$$\text{Alíquota efetiva} = \frac{(F_{12} \times A_t) - D_t}{F_{12}} \quad \text{Equação (3)}$$

Sendo:

$F_{12}$ : faturamento dos últimos 12 meses;

$A_t$ : alíquota do Anexo II do Simples Nacional de acordo com o faturamento;

$D_t$ : dedução do Anexo II do Simples Nacional de acordo com o faturamento.

Além das alíquotas efetivas do Simples Nacional, foram definidos os *royalties* e o percentual de comissionamento para composição da remuneração dos analistas comerciais. A precificação do MVP foi realizada pelo índice multiplicador, também conhecido como *markup*. O cálculo do *markup* foi realizado a partir da [Equação \(4\)](#).

$$\text{Markup} = \frac{1}{(1-V)} \quad \text{Equação (4)}$$

Sendo:

$V$ : somatório dos percentuais variáveis (*royalties*, imposto, comissão e lucro pretendido).

O fluxo de caixa foi elaborado considerando a estrutura de custos estimada. A partir da análise do desempenho financeiro em cinco anos de operação, foi possível a determinação dos indicadores de mercado para avaliação da atratividade do investimento.

O Valor Presente Líquido (VPL) foi calculado com base na geração de caixa (lucro ou prejuízo), a partir da [Equação \(5\)](#).

$$VPL = \sum_1^n \frac{FC_n}{(1+TMA)^n} \quad \text{Equação (5)}$$

Sendo:

*FC*: fluxo de caixa;

*TMA*: taxa mínima de atratividade;

*n*: período de tempo.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) foi calculada com base na geração de caixa (lucro ou prejuízo), a partir da [Equação \(6\)](#).

$$0 = VPL = \sum_1^n \frac{FC_n}{(1+TIR)^n} \quad \text{Equação (6)}$$

Sendo:

*VPL*: valor presente líquido;

*FC*: fluxo de caixa;

*TIR*: taxa interna de retorno;

*n*: período de tempo.

O *payback* foi calculado com base na geração de caixa (lucro ou prejuízo) acumulada, a partir da [Equação \(7\)](#).

$$payback = n - \frac{S_n}{FC_{n+1}} \quad \text{Equação (7)}$$

Sendo:

*n*: ano de referência ao último saldo negativo;

*S<sub>n</sub>*: saldo acumulado do ano *n*;

*FC<sub>n+1</sub>*: fluxo de caixa do ano seguinte ao ano *n*.

O *payback* descontado considerou o custo do capital no tempo, sendo calculado com base na geração de caixa (lucro ou prejuízo) acumulada descontada, a partir da [Equação \(8\)](#).

$$Payback\ descontado = n - \frac{S_n}{FC_{n+1}} \quad \text{Equação (8)}$$

Sendo:

$n$ : ano de referência ao último saldo negativo;

$S_n$ : saldo acumulado do ano  $n$ ;

$FC_{n+1}$ : fluxo de caixa descontado do ano seguinte ao ano  $n$ .

O ponto de equilíbrio (*breakeven point*) foi calculado com base na geração de caixa (lucro ou prejuízo), a partir da [Equação \(9\)](#).

$$Breakeven = n + \frac{|FC_n|}{|FC_n| - FC_{n+1}} \quad \text{Equação (9)}$$

Sendo:

$n$ : ano de referência ao último fluxo de caixa negativo;

$FC_n$ : fluxo de caixa do ano  $n$ ;

$FC_{n+1}$ : fluxo de caixa do ano seguinte ao ano  $n$ .

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante do problema relacionado a presença de arsênio em águas superficiais e subterrâneas em diversas regiões do mundo e do Brasil, principalmente na região do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais, abordada na [seção 3.1](#), o BAA foi selecionado na plataforma tecnológica do GFQO para ser estudado como solução em dois contextos: *i*) tratamento de efluente contaminado por arsênio gerado por mineradoras de ouro; *ii*) tratamento de água subterrânea contaminada por arsênio utilizada como fonte alternativa de abastecimento pela população do município de Ouro Preto, Minas Gerais.

O BAA foi validado em laboratório por meio da prova de conceito experimental que comprovou a capacidade do material para adsorção de arsênio. O avanço no nível de maturidade tecnológica envolve validação de protótipos com amostras reais, o que requer uma aproximação com as demandas das empresas ou da sociedade para a aplicação da tecnologia. Além disso, o desenvolvimento de habilidades relacionadas ao empreendedorismo e inovação é recomendado para que a transferência da tecnologia para o mercado seja bem-sucedida.

### 5.1. Aplicação do bioadsorvente no tratamento de efluente

A interação do GFQO com o grupo temático Qui-Minera da Rede Mineira de Química (RQ-MG) possibilitou a identificação de uma demanda tecnológica relacionada à remoção de arsênio do efluente gerado pelas mineradoras de ouro. Após a aproximação com uma das empresas do setor, foi assinado um acordo de confidencialidade entre a UFOP e a empresa para apresentação das principais informações relacionadas ao efluente.

#### 5.1.1. Programa de pré-aceleração Ideiaz

Visando o desenvolvimento de habilidades relacionadas ao empreendedorismo e à inovação, houve a participação no programa de pré-aceleração Ideiaz, uma iniciativa da ANPROTEC, do SEBRAE e do Ministério da Economia. A Chamada Nacional para Atendimento de Projetos Inovadores, Edital Ideiaz 02/2021, teve como objetivo apoiar a estruturação e o desenvolvimento de projetos de impacto socioambiental em estágio inicial. Formou-se uma equipe com alunos de mestrado e doutorado do GFQO para a participação no programa.

O programa Ideiaz teve duração de dez semanas e possibilitou a participação da equipe em atividades de mentoria, consultoria organizacional, suporte tecnológico e qualificação empreendedora. A aceleradora de empresa GROW<sup>+</sup> foi selecionada pelo

programa para capacitação da equipe e suporte na aplicação das ferramentas de inovação visando a aplicação do BAA no contexto das mineradoras de ouro.

A participação no programa mostrou-se relevante, principalmente, para o desenvolvimento de habilidades complementares na equipe, tais como técnicas de comunicação com as empresas, identificação da proposta de valor para o mercado alvo da tecnologia e identificação de novas possibilidades de inserção da tecnologia no mercado. Dentre as ferramentas utilizadas, destaca-se o Canvas de Validação de Hipóteses, apresentado na [Figura 9](#), utilizado para identificação de desafios enfrentados pelas empresas mineradoras de ouro no processo de gerenciamento de efluentes.

**Figura 9** – Canvas de Validação de Hipóteses para aplicação do bioadsorvente

### CANVAS DE VALIDAÇÃO DE HIPÓTESES

HIPÓTESE	PERGUNTAS
<p>O cliente gera efluentes industriais que necessitam de tratamento para serem lançados nos corpos d'água de acordo com a legislação vigente.</p> <p>Nós acreditamos que o usuário tenha problemas com o tratamento dos efluentes contendo arsênio, pois faltam soluções no mercado que atendam aos critérios da legislação.</p> <p>A utilização do material permitirá a disposição dos efluentes tratados em corpos d'água, além de reduzir o volume de efluentes dispostos em barragens e possibilitar a geração de água de reuso.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hoje, como a empresa gerencia os efluentes gerados no processo de beneficiamento?</li> <li>- Existe algum efluente que demanda maior <b>atenção</b> em algum aspecto?</li> <li>- <b>Quais</b> são as <b>características</b> dos <b>principais</b> efluentes industriais gerados pela empresa?</li> <li>- Houve alguma <b>mudança</b> no gerenciamento desses efluentes ao longo do <b>tempo</b>?</li> <li>- Qual o impacto financeiro da disposição dos resíduos na <b>barragem</b>?</li> <li>- O tratamento de efluentes é feito pela empresa ou é <b>terceirizado</b>?</li> <li>- Como vocês lidam com a questão do <b>arsênio</b> nos efluentes?</li> <li>- Quais são as iniciativas que a empresa vem adotando em relação ao tema <b>ESG</b>?</li> <li>- Por ser uma mineradora, qual a percepção que você tem em relação à <b>imagem</b> socioambiental frente a sociedade.</li> <li>- Você conhece alguma iniciativa/programa na empresa que visa a redução da poluição na fonte, como utilização de materiais <b>renováveis</b> ou <b>recicláveis</b>?</li> <li>- Já existe alguma parte do processo que usa <b>água de reuso</b>?</li> </ul> <div style="text-align: center; background-color: #f4a460; padding: 5px; margin: 10px 0;"><b>RESULTADOS</b></div> <p>Hipótese validada? SIM <input checked="" type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/></p>

**Fonte:** Modelo disponibilizado pela GROW<sup>+</sup> e preenchido pela equipe participante do Ideiaz (2022).

Foi definido como hipótese primária a aplicação do adsorvente para remoção de arsênio do efluente gerado pelas mineradoras. Foram descritos os possíveis efeitos secundários advindos do uso da tecnologia, tal como a possibilidade de geração de água de reuso para outros processos na unidade de mineração e o interesse no uso de uma tecnologia de base renovável.

As perguntas foram estruturadas como um guia para ser utilizado em reuniões com os potenciais clientes. Busca-se entender como a empresa realiza o gerenciamento dos efluentes e o histórico de problemas relacionados à geração de efluentes pela mineração de ouro. Foi recomendado não interferir tendenciosamente nas respostas para que sejam

obtidas informações de acordo com a realidade da empresa. Foram evitadas perguntas como “O que você acha do novo bioadsorvente para remoção de arsênio que desenvolvemos?” e “Quanto você pagaria por um bioadsorvente de arsênio?”.

Foi realizada uma reunião com uma das mineradoras de ouro que atua no estado de Minas Gerais em que foram utilizadas as perguntas previamente listadas no Canvas de Validação de Hipóteses. A interação possibilitou compreender o processo utilizado atualmente para o tratamento do efluente gerado, os problemas enfrentados nesse contexto e as principais necessidades da empresa. Como resultado da reunião, identificou-se que a empresa possui um sistema para tratamento do efluente gerado pela atividade de mineração, com vazão estimada de  $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  e concentração de arsênio total na ordem de  $3,9 \text{ mg L}^{-1}$ , parâmetro acima dos limites máximos de  $0,033 \text{ mg L}^{-1}$ , estabelecido pela normativa do estado de Minas Gerais, Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N° 1 de 2008 (CONAMA, 2011), e  $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ , estabelecido pela Resolução CONAMA N° 430 de 2011 (COPAM, 2008).

Diante dessas informações, a hipótese primária da necessidade de materiais seletivos para a remoção de arsênio do efluente gerado pela empresa foi validada. A interação com a empresa possibilitou identificar a existência de um programa que visa o descomissionamento de barragens, sendo assim, o volume de efluente gerado e, conseqüentemente, a demanda por materiais específicos para a remoção de arsênio pode ser ainda maior.

Durante o programa Ideiaz, foram utilizadas outras ferramentas de inovação, tais como a Jornada do Cliente, o Canvas Proposta de Valor e o Modelo C, apresentados no APÊNDICE I. A construção da Jornada do Cliente possibilitou identificar as ações dos clientes em cada fase do processo de compra durante a decisão de escolha por determinado produto para o tratamento do efluente.

A aplicação do Canvas Proposta de Valor possibilitou a definição das propostas de valor ambiental e comercial. Definiu-se como proposta de valor socioambiental que “a tecnologia permite a mitigação dos impactos ambientais gerados pela atividade de mineração de ouro, por meio da utilização de um bioadsorvente preparado a partir de um subproduto industrial, contribuindo com a melhoria da imagem socioambiental da empresa”. Como proposta de valor comercial foi estabelecido que “a tecnologia permite o tratamento do efluente contaminado com arsênio de acordo com a legislação ambiental para lançamento no meio ambiente e contribui para a geração de água de reuso para o processo de mineração”.

A definição da proposta de valor mostra-se relevante para o desenvolvimento de um modelo de negócio apropriado ao mercado consumidor. O valor que determinado produto possui para o cliente vai além do valor financeiro pago por ele. No caso da utilização do BAA pelas mineradoras de ouro, além do tratamento do efluente contaminado com arsênio para adequação à legislação, pode-se englobar o valor percebido pela empresa na utilização de materiais de fontes renováveis, na produção de água de reuso e na mitigação dos conflitos regionais causados pelas atividades de mineração.

Nesse sentido, as práticas empresariais que contribuem para o equilíbrio ambiental e social, em conjunto com ações de governança corporativa, permitem que empresas listadas em bolsa de valores sejam classificadas por índices que procuram medir a performance de títulos que cumprem critérios de sustentabilidade, como é o caso do Índice Brasil ESG (B3, 2022).

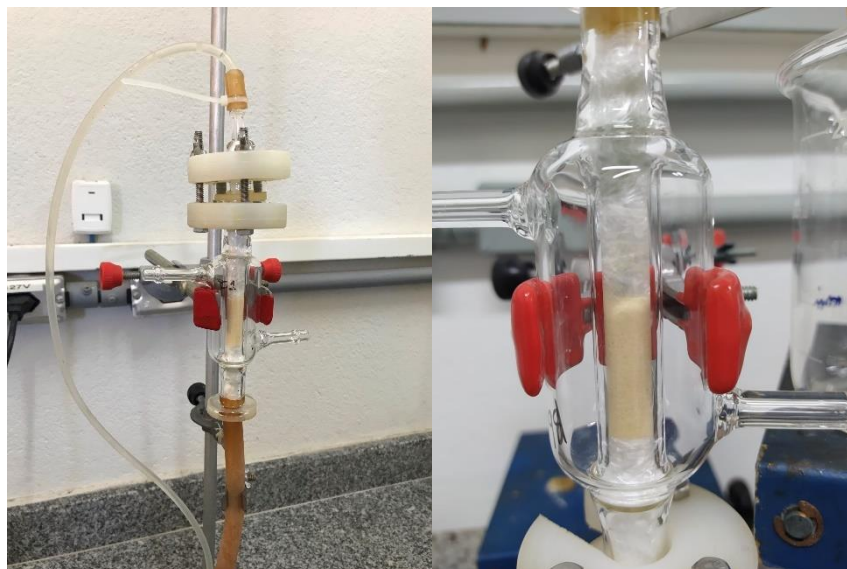
Após identificar as principais necessidades dos clientes, bem como os aspectos que podem ser explorados como proposta de valor para as mineradoras de ouro, foi possível a construção do Modelo C, uma ferramenta para modelagem de negócios de impacto socioambiental que possibilita a visualização das principais características do empreendimento. O Modelo C é uma ferramenta de rápida visualização que descreve as principais estratégias de cada área de um negócio de impacto socioambiental. Além disso, recomenda-se que a ferramenta esteja em constante atualização.

#### 5.1.2. O sistema piloto de tratamento em modo contínuo

A validação da demanda de mercado permitiu que fossem planejados estudos de adsorção em coluna de leito fixo com base nas informações do efluente real, obtidos pela interação com a mineradora de ouro. O ensaio em coluna de leito fixo possui, como característica principal, a similaridade ao processo contínuo presente em estações de tratamento de efluente industrial. O sistema piloto funciona como uma unidade de tratamento em pequena escala, conforme apresentado na [Figura 10](#).

O adsorvente foi empacotado na região central da coluna utilizando-se esferas e lâ de vidro que permitem que o adsorvente seja mantido fixo no leito, evitando o arraste pelo líquido. Além disso, as esferas auxiliam a dispersão homogênea do líquido pela coluna, evitando a formação de caminhos preferenciais durante a operação de adsorção. Utilizou-se uma bomba peristáltica com vazão regulável para direcionar a amostra em direção à coluna de vidro empacotada com o adsorvente.

Figura 10 – Sistema piloto para teste de adsorção em modo contínuo



Fonte: Autoria própria (2022).

Foram realizados quatro ensaios em coluna de leito fixo com variação dos parâmetros utilizados no sistema piloto, conforme apresentado na Tabela 3. Os ensaios 1, 2 e 3 foram realizados com amostras contaminadas em laboratório para avaliação da influência do fluxo do influente alimentado à coluna e do diâmetro da coluna no processo de adsorção. O ensaio 4 foi realizado com uma amostra de efluente da mineração de ouro.

Tabela 3 – Parâmetros dos testes em modo contínuo em coluna de leito fixo

Ensaio	Massa de BAA / g	Diâmetro da Coluna / mm	Altura do Leito / mm	Vazão Média / mL min <sup>-1</sup>	Tipo de Fluxo	Tempo de Operação / min	Concentração de Arsênio / mg L <sup>-1</sup>	pH
1	0,500	10,0	26,0	14,94	Ascendente	260	6,49 ± 0,03	7,00
2	0,500	10,0	27,0	15,04	Descendente	300	6,34 ± 0,05	7,00
3	0,502	20,0	10,0	15,60	Descendente	300	6,35 ± 0,03	7,00
4	0,500	10,0	30,0	16,14	Descendente	300	8,1 ± 0,7	8,59

Fonte: Autoria própria (2022).

As configurações utilizadas nos ensaios 1, 2 e 3 possibilitaram validar diferentes condições de operação, uma vez que o sistema de tratamento industrial pode utilizar fluxo do influente alimentado à coluna ascendente ou descendente e ser dimensionado com tanques de fibra de vidro para armazenamento de elemento filtrante de tamanhos variados.

A vazão utilizada nos ensaios foi definida proporcionalmente à vazão do sistema informada pela mineradora de ouro. A partir da divisão do volume dos tanques de fibra



de vidro utilizados em sistemas de tratamento de efluentes pelo volume de BAA ocupado em cada coluna de vidro, obteve-se um fator de proporção para o cálculo da vazão equivalente utilizada nos ensaios.

Utilizou-se como base os tanques de fibra de vidro utilizados para o tratamento de água e efluente em larga escala, modelos  $12 \times 48$  com capacidade de 78 L e  $13 \times 54$  com capacidade de 109 L para comparação com as colunas piloto. O volume médio ocupado por 0,5 g de BAA nas colunas de 10 mm e 20 mm de diâmetro foi de  $2,2 \text{ cm}^3$  e  $3,1 \text{ cm}^3$ , respectivamente. A comparação do volume da coluna de 10 mm com o tanque de fibra de vidro de 78 L apresentou uma variação de, aproximadamente, 35 mil vezes, já a comparação do volume da coluna de 20 mm com o tanque de fibra de vidro de 109 L, apresentou uma variação de, aproximadamente 35 mil vezes. Considerando que será utilizado 90 % do volume útil do tanque, a proporção média do volume entre os sistemas foi de, aproximadamente, 32 mil vezes.

Dessa forma, a vazão equivalente foi calculada para utilização nos ensaios em coluna por meio da divisão da vazão de  $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ , informada pela mineradora de ouro, pela variação média do volume entre os sistemas. A vazão equivalente calculada para utilização nos ensaios em coluna foi de  $15,7 \text{ mL min}^{-1}$ . Operou-se o sistema em modo contínuo com coletas de amostras para determinação da curva de ruptura do material, isto é, quando a razão entre a concentração da amostra no tempo de coleta ( $C_t$ ) e a concentração inicial ( $C_i$ ) se iguala a 0,05 ou 5 %. Por outro lado, a saturação do material é alcançada quando a razão  $C_t/C_i$  se iguala a 0,95 ou 95 %. As coletas foram realizadas ao longo do experimento em intervalos de tempo pré-determinados.

O primeiro ensaio foi configurado com o fluxo do influente alimentado à coluna ascendente para que o efeito da gravidade não tivesse interferência na passagem do líquido pela coluna, reduzindo a ocorrência de caminhos preferenciais na passagem da água pelo material. Além disso, a coluna de 10 mm de diâmetro foi utilizada para que o tempo espacial, definido pela divisão entre o volume da coluna e a vazão do líquido, fosse menor, o que aumentou o tempo de contato da amostra com o material e favoreceu a adsorção dos contaminantes na coluna de leito fixo.

O ensaio 1 foi realizado por um tempo total de operação de 260 min. Nas duas primeiras horas foram coletadas amostras a cada 8 min e, nas horas seguintes, a cada 10 min, totalizando 29 amostras. Pôde-se entender o comportamento do material ao longo do tempo e identificar o ponto de ruptura e o início da saturação da coluna, uma vez que o material não alcançou o ponto de saturação, conforme apresentado na [Figura 11](#).

O tempo de ruptura do ensaio 1, ou seja, o tempo de operação que a coluna conseguiu tratar o influente, entregando o efluente com uma concentração inferior ao limite de  $0,033 \text{ mg L}^{-1}$ , definido pela norma (COPAM, 2008), foi de 115 min. Esse tempo correspondeu a uma relação  $C_t/C_i$  de 0,51 %, sendo  $C_t$ , equivalente à concentração de  $0,033 \text{ mg L}^{-1}$ . A capacidade de adsorção de arsênio obtida pelo ensaio 1 foi de  $35,7 \pm 0,2 \text{ mg g}^{-1}$ , valor superior ao obtido nos estudos iniciais em batelada de  $27,3 \text{ mg g}^{-1}$ , demonstrando que a maior força motriz, definida pela diferença entre a concentração inicial e a concentração no equilíbrio ( $C_i - C_e$ ), para a adsorção em modo contínuo em comparação ao modo batelada, provocou um maior deslocamento do equilíbrio no sentido dos produtos, isto é, BAA-As(V).

Em seguida, realizou-se a dessorção de arsênio do BAA-As(V) em modo contínuo com solução aquosa de  $\text{HNO}_3$   $0,08 \text{ mol L}^{-1}$ . A operação de dessorção foi realizada no mesmo sistema piloto de adsorção, teve duração de 4 min e 20 s e alcançou eficiência de 95,5 %. Observou-se uma eficiência de 95,4 % nos primeiros 3 min de operação, o que justificou a redução do tempo de dessorção do segundo ensaio.

A principal alteração do sistema para a realização do ensaio seguinte foi a modificação do tipo de fluxo do influente alimentado à coluna de ascendente para descendente. Utilizou-se a coluna de 10 mm de diâmetro para que o desempenho do sistema fosse avaliado considerando exclusivamente a mudança do fluxo. O ensaio 2 foi realizado por um tempo total de 300 min, duração superior ao primeiro ensaio para que fosse possível a observação da saturação do adsorvente.

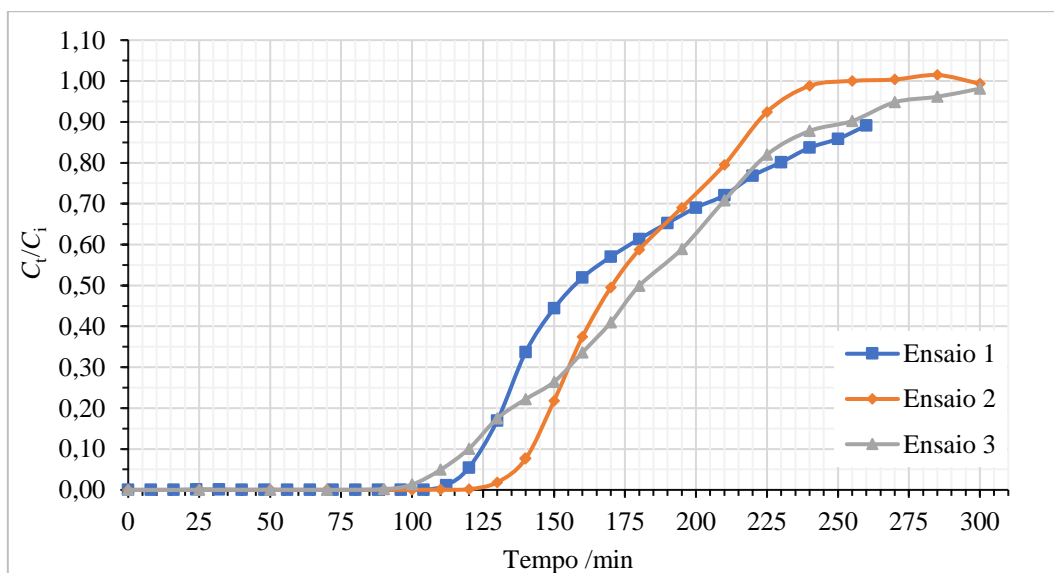
Para realização do segundo ensaio, foram coletadas amostras a cada 20 min até 1 h e 20 min de operação. Em seguida, o intervalo foi reduzido para 10 min até completar 3 h. Por fim, foram coletadas amostras a cada 15 min até completar as cinco horas totais de ensaio, resultando em um total de 21 amostras. Pôde-se observar que a saturação do adsorvente ocorreu entre as coletas realizadas em 240 e 255 min, conforme apresentado na [Figura 11](#).

O tempo de ruptura do ensaio 2 foi de 130 min. Esse tempo correspondeu a uma relação  $C_t/C_i$  de 0,52 %, sendo  $C_t$ , equivalente à concentração de  $0,033 \text{ mg L}^{-1}$ . A capacidade de adsorção de arsênio obtida pelo ensaio 2 foi de  $35,5 \pm 0,2 \text{ mg g}^{-1}$ , alcançando um desempenho similar ao primeiro ensaio. Em seguida, realizou-se a dessorção de arsênio do BAA-As(V) com solução aquosa de  $\text{HNO}_3$   $0,08 \text{ mol L}^{-1}$ . A operação de dessorção de arsênio do adsorvente saturado teve duração de 3 min e 20 s e alcançou eficiência de 98,0 %.

O terceiro ensaio foi realizado com fluxo de influente alimentado à coluna descendente, utilizando a coluna de 20 mm de diâmetro. A razão entre o volume de material e a vazão é aumentada na coluna de 20 mm, uma vez que o volume da coluna de 20 mm é superior ao volume da coluna de 10 mm para uma mesma massa de BAA. Dessa forma, foi avaliada a interferência do aumento do tempo espacial na adsorção, ou seja, a diminuição do tempo de contato da amostra com o material. Utilizou-se o mesmo planejamento do tempo de coleta das amostras do segundo ensaio, tendo em vista que o tempo de operação foi suficiente para a saturação do material, conforme apresentado na [Figura 11](#).

O tempo de ruptura do ensaio 3 foi de 100 min. Esse tempo correspondeu a uma relação  $C_t/C_i$  de 0,52 %, sendo  $C_t$ , equivalente à concentração de  $0,033 \text{ mg L}^{-1}$ . A capacidade de adsorção de arsênio obtida pelo ensaio 3 foi de  $38,1 \pm 0,3 \text{ mg g}^{-1}$ , ou seja, o aumento do tempo espacial não impactou negativamente a capacidade de adsorção do leito, representando, portanto, um desempenho que pode ser considerado excelente para o sistema de adsorção em modo contínuo. Após a saturação do material adsorvente, realizou-se novamente a dessorção de arsênio do BAA-As(V) com solução aquosa de  $\text{HNO}_3$   $0,08 \text{ mol L}^{-1}$ . A operação de dessorção de arsênio do adsorvente utilizado no terceiro ensaio teve duração de 3 min e alcançou eficiência de 99,6 %.

**Figura 11** – Gráfico do estudo de adsorção em coluna de leito fixo



**Fonte:** Autoria própria (2022).

A regeneração do BAA após utilização para remoção de arsênio em meio aquoso obteve resultado considerado excelente nos três ensaios, sendo possível a sua aplicação em vários ciclos de adsorção, o que possibilita a redução dos custos de tratamento do efluente a longo prazo. A operação de dessorção foi considerada de fácil realização, uma

vez que não é necessário remover o BAA do sistema para sua regeneração. Outra vantagem importante da recuperação do BAA nas condições de operação propostas foi a redução da quantidade de resíduo gerado. Para cada 963,6 mL de amostra tratada no terceiro ensaio foram gerados 10 mL de resíduo líquido contaminado com arsênio do processo de dessorção. Dessa forma, foi possível a redução do volume da amostra em até 96 vezes. A destinação do BAA saturado com arsênio será discutida na [seção 5.2.6](#).

Os três ensaios em coluna de leito fixo obtiveram resultado considerado excelente em modo contínuo. De acordo com o desempenho observado, as variações no tipo de fluxo do influente alimentado à coluna, ascendente ou descendente, e no diâmetro da coluna, não interferiram na capacidade de adsorção de arsênio do BAA. Dessa forma, uma amostra de efluente foi testada para avaliação do comportamento do material na presença de outros ânions possivelmente competidores pelos sítios de adsorção do material com o arsênio.

O ensaio 4 foi realizado com uma amostra de efluente obtida de uma mineradora de ouro. Utilizou-se o fluxo de influente alimentado à coluna descendente e a coluna com diâmetro de 10 mm, por apresentar menor tempo espacial quando comparada com a coluna de 20 mm de diâmetro. O sistema piloto foi configurado para reprodução em menor escala do tanque de fibra de vidro modelo de 12 × 48 com capacidade de 78 L.

A operação da coluna de leito fixo foi realizada com o mesmo tempo de coleta das amostras planejado para os ensaios 2 e 3. O ensaio com o efluente demonstrou a necessidade da remoção de sulfato em etapa preliminar à adsorção, uma vez que houve a competição entre o sulfato, em maior concentração (2.378,1 mg L<sup>-1</sup>), e o arsênio, em menor concentração (8,1 mg L<sup>-1</sup>), pelos sítios ativos do bioadsorvente, sendo aquele, em maior concentração, adsorvido preferencialmente pelo leito.

### 5.1.3. Proposta de remoção de sulfato do efluente

Diante dos resultados promissores obtidos pelos três primeiros ensaios em coluna de leito fixo, notou-se a necessidade da redução da concentração de sulfato do efluente antes da operação de adsorção utilizando o BAA. A concentração de sulfato informada pela mineradora foi de 1.000 mg L<sup>-1</sup>, o que representa uma concentração de sulfato 123,5 vezes superior à de arsênio. [De matos et al. \(2018\)](#) sugeriu o emprego de bactérias redutoras de sulfato como método para a remoção de sulfato na presença de arsênio. A técnica foi selecionada pela capacidade simultânea de remoção de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e As(III), embora a utilização do BAA em uma etapa posterior de polimento exigiria uma etapa de oxidação

de As(III) para As(V). O método foi validado pelos autores por meio de testes em reatores semicontínuos de fluxo ascendente, operados por mais de 100 dias.

O desempenho de remoção observado para  $\text{SO}_4^{2-}$  e As(III) foi de 74,8 % e 80 %, respectivamente. A aplicação das bactérias promoveu a formação de fases minerais que possuem arsênio e enxofre na sua composição, originadas pela reação entre o arsênio e o sulfeto biogênico. Os mecanismos que podem estar envolvidos no processo são: *i*) precipitação como sulfeto de arsênio ou *ii*) adsorção em esferas de alginato de cálcio, utilizadas para o crescimento das bactérias (DE MATOS *et al.*, 2018).

De acordo com De matos *et al.* (2018), a utilização desse método possibilita, não só a remoção do  $\text{SO}_4^{2-}$ , que interfere na adsorção de arsênio, mas também a remoção de As(III), que possui maior complexidade para ser removido em meio aquoso, quando comparado com o As(V). Dessa forma, o BAA pode ser empregado como etapa de polimento para a remoção de As(V) após a aplicação do método de remoção de  $\text{SO}_4^{2-}$  e da oxidação do As(III) não removido em As(V).

## 5.2. Aplicação do bioadsorvente no tratamento de água

### 5.2.1. Projeto Interinstitucional

O Edital Interinstitucional Nº 1 de 2020, fruto de uma parceria entre o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e a Universidade Federal de Viçosa (UFV), teve como objetivo apoiar projetos de extensão em interface com a pesquisa para promoção dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A proposta intitulada “Projeto Interinstitucional” foi submetida pelo GFQO e aprovada para o desenvolvimento de dispositivos contendo BAA acopláveis em filtros de barro, possibilitando que a água proveniente de fontes alternativas de abastecimento, utilizada em residências do município de Ouro Preto – Minas Gerais, alcance melhores níveis de qualidade. As atividades tiveram duração de 12 meses e contaram com apoio financeiro do Ministério Público do Trabalho (MPT) para execução.

A cidade de Ouro Preto foi escolhida por apresentar parte de sua população como usuária de fontes alternativas de água contaminadas com arsênio, muitas delas oriundas de nascentes ou mesmo de antigas minas de ouro abandonadas, representando um sério problema de saúde pública (BORBA; FIGUEIREDO; CAVALCANTI, 2004; VAREJÃO *et al.*, 2011). Além disso, Ouro Preto possui inúmeras fontes alternativas de água

subterrânea localizadas próximas às minas de ouro desativadas. Foram coletadas quatro amostras de água em locais onde a população utiliza essas fontes alternativas de abastecimento, tais como os bairros Antônio Dias, Alto da Cruz e Piedade.

Dentre as amostras analisadas, duas apresentaram níveis de arsênio acima do Valor Máximo Permissível (VMP) de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ , estabelecido pela Portaria GM/MS N° 888 de 2021, com concentrações de  $29,58 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $20^{\circ} 23' 07'' \text{ S}$ ,  $43^{\circ} 29' 40'' \text{ O}$ ) e  $23,11 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $20^{\circ} 23' 08'' \text{ S}$ ,  $43^{\circ} 29' 52'' \text{ O}$ ). As outras duas amostras se enquadraram no limite estabelecido pela legislação, com concentrações de arsênio de  $4,47 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $20^{\circ} 23' 09'' \text{ S}$ ,  $43^{\circ} 29' 12'' \text{ O}$ ) e  $1,37 \mu\text{g L}^{-1}$  ( $20^{\circ} 23' 11'' \text{ S}$ ,  $43^{\circ} 29' 52'' \text{ O}$ ). Apesar da conformidade em relação à normativa de referência, o consumo a longo prazo representa um risco aos indivíduos que utilizam essas fontes de abastecimento alternativas.

### 5.2.2. Comparação do bioadsorvente com materiais concorrentes

O desempenho do bioadsorvente foi comparado com os materiais comerciais para avaliar o potencial de aplicação do BAA no mercado. Foi realizado um estudo de adsorção em batelada para determinação do desempenho de remoção de arsênio dos materiais comerciais com amostras de água natural contaminada. Os materiais comerciais encontrados no mercado foram a alumina ativada ([TITAN WATER PRO, 2022](#)), o quartzo revestido com óxido de manganês ([CELTA BRASIL, 2022](#)), a resina de troca iônica ([LENNTECH, 2022a](#)), a resina de troca iônica impregnada com ferro ([PUROLITE, 2022](#); [SUNRESIN, 2022](#)) e o hidróxido férrico granulado ([LENNTECH, 2022b](#)).

Os ensaios de adsorção em batelada foram realizados com o BAA, a alumina ativada e o quartzo revestido com óxido de manganês. Além disso, uma vela de cerâmica da marca ACQUA AZZURA foi desmontada para obtenção do carvão ativado presente no seu interior. Optou-se por incluir o carvão ativado encontrado na vela, uma vez que o material pode ser utilizado no filtro de barro. O filtro TWP com alumina ativada foi adquirido por US\$ 29,95 na Califórnia, EUA, pela ONG Full Belly Brasil e doado para a realização dos testes. Já o quartzo revestido com óxido de manganês foi doado pelo fornecedor Celta Brasil que comercializa o quilo do produto por R\$ 34,00.

O estudo de adsorção em batelada foi realizado em triplicata para cada material, com amostras de água natural contendo  $39 \pm 4 \mu\text{g L}^{-1}$  de arsênio e pH 6,95. O experimento foi realizado em incubadora com agitação orbital de 130 rpm por 1 h. As massas dos materiais utilizados no estudo, a concentração de equilíbrio ( $C_e$ ), a capacidade de adsorção no equilíbrio ( $q_e$ ) e a capacidade de remoção ( $R$ ) obtidas para cada material são apresentadas na [Tabela 4](#).

**Tabela 4** – Parâmetros do estudo de adsorção de arsênio em materiais comerciais e BAA em batelada

Material	Massa / g			$C_e$ / mg L <sup>-1</sup>			$q_e$ / mg g <sup>-1</sup>			$q_{e,média}$ mg g <sup>-1</sup>	R / %
	A	B	C	A	B	C	A	B	C		
Alumina	0,0201	0,0200	0,0200	0,007	0,001	<0,001	0,16	0,16	0,19	0,17 ± 0,02	93 ± 11
Quartzo	0,0200	0,0199	0,0199	0,024	0,023	0,027	0,08	0,08	0,06	0,07 ± 0,01	37 ± 5
Carvão ativado	0,0201	0,0201	0,0200	0,029	0,033	0,028	0,05	0,05	0,03	0,04 ± 0,01	23 ± 7
BAA	0,0200	0,0199	0,0200	0,006	0,008	0,014	0,17	0,17	0,16	0,16 ± 0,02	76 ± 11

Fonte: Autoria própria (2022).

O resultado do estudo mostrou que o desempenho do BAA, em termos de remoção de arsênio, foi ligeiramente inferior à alumina ativada, com os materiais apresentando valores de  $q_{e,médio}$  de  $0,16 \pm 0,02$  mg g<sup>-1</sup> e  $0,17 \pm 0,02$  mg g<sup>-1</sup>, respectivamente, conferindo ao bioadsorvente uma capacidade de adsorção de arsênio adequada para comercialização. Quando comparado com o quartzo e o carvão ativado, o desempenho do BAA foi superior em 129 % e 300 %, respectivamente.

### 5.2.3. Cinética de adsorção do bioadsorvente

O estudo de cinética de adsorção do BAA foi realizado em batelada para avaliar a velocidade da adsorção de arsênio utilizando água natural contaminada. Foram coletadas, em duplicata, 18 amostras de 100 mL de água natural. As massas de BAA utilizadas no estudo, o tempo de incubação por amostra, a concentração de equilíbrio ( $C_e$ ), a capacidade de adsorção no equilíbrio ( $q_e$ ) e a capacidade de remoção ( $R$ ) obtidas para cada amostra são apresentadas na [Tabela 5](#).

**Tabela 5** – Parâmetros da cinética de adsorção de arsênio em BAA com amostra de água natural

Amostra	Massa / g		Tempo / min	$C_e$ / mg L <sup>-1</sup>		$C_{e,média}$ / mg L <sup>-1</sup>	$q_e$ / mg L <sup>-1</sup>		$q_{e,média}$ / mg g <sup>-1</sup>	R / %
	A	B		A	B		A	B		
1	0,0200	0,0200	30	0,002	0,002	0,002 ± 0,000	0,1813	0,1813	0,181 ± 0,000	95 ± 0
2	0,0200	0,0200	60	0,001	0,003	0,002 ± 0,001	0,1865	0,1760	0,181 ± 0,007	95 ± 4
3	0,0199	0,0199	120	0,002	0,002	0,002 ± 0,000	0,1822	0,1822	0,182 ± 0,000	95 ± 0
4	0,0199	0,0199	240	0,002	0,001	0,0015 ± 0,0007	0,1822	0,1875	0,185 ± 0,004	96 ± 2
5	0,0199	0,0199	360	0,002	0,002	0,002 ± 0,000	0,1822	0,1822	0,182 ± 0,000	95 ± 0
6	0,0201	0,0201	480	0,002	0,002	0,002 ± 0,000	0,1804	0,1804	0,180 ± 0,000	95 ± 0
7	0,0200	0,0200	600	0,002	0,005	0,004 ± 0,002	0,1813	0,1655	0,17 ± 0,01	90 ± 6
8	0,0200	0,0200	720	0,002	0,003	0,0025 ± 0,0007	0,1813	0,1760	0,181 ± 0,004	93 ± 2
9	0,0199	0,0199	900	0,004	0,003	0,0035 ± 0,0007	0,1716	0,1769	0,172 ± 0,004	90 ± 2

Fonte: Autoria própria (2022).



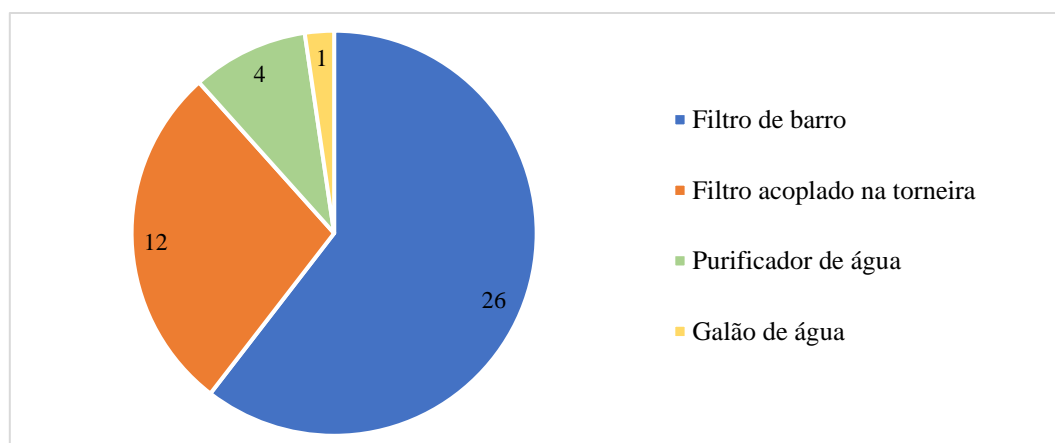
As amostras apresentaram valores de pH 6,96 e concentração média de arsênio de  $36,5 \pm 0,7 \mu\text{g L}^{-1}$ . O experimento foi realizado em incubadora por 15 h sob velocidade de agitação orbital de 130 rpm. O equilíbrio do sistema foi alcançado em até 30 min pela amostra 1, o que mostra o potencial de aplicação do BAA em sistemas de adsorção em fluxo para tratamento de água contaminada com arsênio.

Ressalta-se que a capacidade de adsorção de equilíbrio apresentada pelo estudo não reflete a capacidade de adsorção máxima do material, uma vez que a quantidade média de BAA empregada no estudo foi de 0,0200 g, quantidade suficiente para adsorção de 546  $\mu\text{g}$  de arsênio, considerando a capacidade de adsorção máxima de 27,3  $\text{mg g}^{-1}$  alcançada nos estudos de adsorção iniciais (MAIA *et al.*, 2020). Dessa forma, não houve saturação do bioadsorvente no estudo, já que cada amostra de 100 mL de água possui apenas 3,65  $\mu\text{g}$  de arsênio, valor inferior ao potencial de adsorção da quantidade em massa de BAA utilizada no estudo de cinética.

#### 5.2.4. Desenvolvimento do protótipo para aplicação do bioadsorvente

Foi realizada uma pesquisa por meio do *website Google Forms* para verificar qual sistema de filtração é mais utilizado na região de Ouro Preto. As respostas à pesquisa foram apresentadas na [Figura 12](#).

**Figura 12** – Gráfico das respostas à pesquisa sobre os sistemas de filtração utilizados em Ouro Preto



Fonte: Autoria própria (2022).

Visando a aplicação do BAA para o tratamento de água natural contendo arsênio, foi desenvolvido um protótipo para ser acoplado no filtro de barro, uma vez que grande parte das pessoas residentes em Ouro Preto e região utilizam esse sistema de filtração em suas residências. O filtro de barro é um filtro de baixo custo e já foi considerado o melhor purificador de água do mundo (INGRAM 2006). O dispositivo D1 foi montado com materiais comerciais de baixo custo. Utilizou-se um tubo de cloreto de polivinila (PVC)



de 5 cm de comprimento e 20 mm de diâmetro recheado com BAA, formando uma coluna de leito fixo acoplável ao filtro de barro, conforme ilustrado na [Figura 13](#).

**Figura 13** – Dispositivo D1 acoplável ao filtro de barro



**Fonte:** Autoria própria (2022).

O bioadsorvente foi fixado no interior do tubo PVC com esferas e lã de vidro. Uma das extremidades do dispositivo foi tampada com uma *cap* (tampa) de 20 mm com furos para que a passagem de água fosse possível, sendo a outra extremidade fixada com cola para PVC (específica para tubulação de água) na saída da vela do filtro de barro.

Foram realizados testes com o protótipo para avaliação do funcionamento do dispositivo adsorvente, tendo como sistema de controle, um filtro de barro sem o dispositivo adsorvente sendo operado nas mesmas condições. Os testes realizados em laboratório permitiram a identificação de desafios relacionados ao sistema como um todo, tais como o modo de fixação, tamanho do dispositivo e a compactação do material que pode ocasionar a redução da taxa de filtração devido ao aumento da perda de carga.

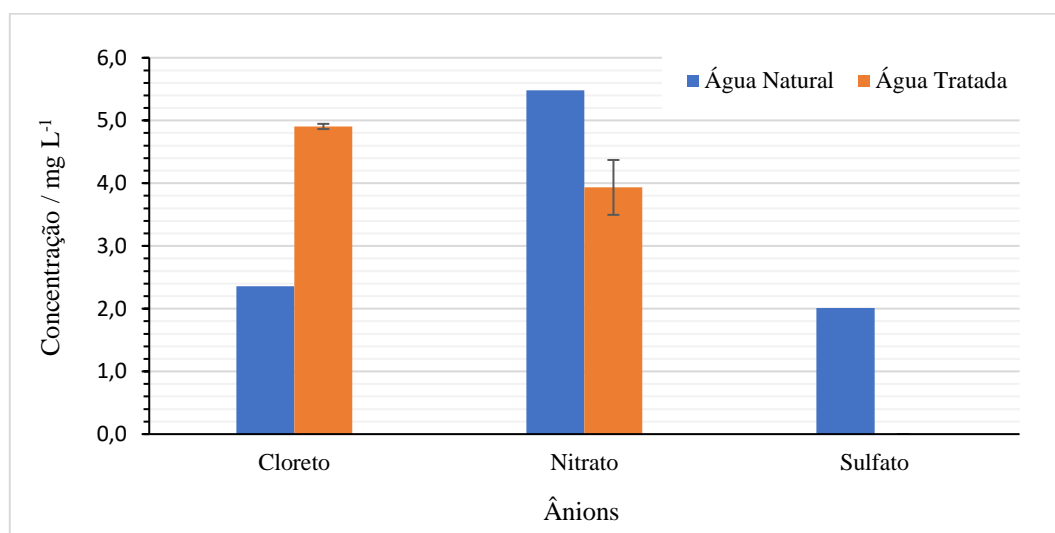
Os filtros foram operados por 15 dias com uma média de 8,9 L de água tratada por dia e coleta de amostra diária. A concentração de arsênio da água natural utilizada no ensaio foi de  $38 \pm 1 \mu\text{g L}^{-1}$  e a quantidade de BAA utilizada foi de 0,5 g. O filtro com o dispositivo adsorvente obteve uma remoção de arsênio de  $44 \pm 14 \%$ , já o filtro controle apresentou uma remoção de  $42 \pm 18 \%$ , reduzindo o teor de arsênio da água, após o tratamento, para  $21 \pm 5 \mu\text{g L}^{-1}$  e  $22 \pm 7 \mu\text{g L}^{-1}$ , respectivamente.

Observou-se que o filtro controle apresentou uma capacidade intrínseca de remoção de arsênio e, além disso, observou-se também a necessidade de identificação dos interferentes no processo de adsorção de arsênio pelo BAA, haja visto que sob condições

consideradas ideais, a quantidade em massa de BAA aplicada ao dispositivo deveria ter sido suficiente para alcançar uma remoção superior àquela observada experimentalmente.

A partir da análise dos ânions presentes na água natural, identificaram-se os interferentes na operação de adsorção de arsênio pelo dispositivo D1, conforme ilustrado na Figura 14. Os resultados mostram que o nitrato e o sulfato apresentaram teores 144 e 53 vezes superiores à concentração inicial de arsênio, respectivamente. Esses ânions interferiram na adsorção de arsênio e apresentaram maior afinidade pelos sítios ativos do material, sendo preferencialmente adsorvidos pelo dispositivo D1. Portanto, justifica-se o aumento dos níveis de cloreto na água pelo mecanismo de troca iônica do bioadsorvente, uma vez que ânions cloreto são liberados do material para que outros ânions ocupem os sítios de adsorção.

**Figura 14** – Gráfico da concentração de ânions na água natural e tratada pelo dispositivo D1



**Fonte:** Autoria própria (2022).

Dessa forma, mostra-se necessário um segundo dispositivo para remoção de arsênio após a remoção dos ânions interferentes. Foram sugeridas duas opções complementares ao dispositivo D1: *i*) uma coluna com o material adsorvente (dispositivo D2), acoplada à torneira de água tratada do filtro de barro; *ii*) três tubos adsorventes (dispositivo D3) inseridas no fundo do reservatório de água tratada. Dessa forma, a configuração do protótipo visa a remoção de arsênio da água pelo dispositivo complementar D2 ou D3, após a remoção dos interferentes pelo dispositivo D1.

O dispositivo complementar D2 é composto por um tubo de PVC de 8 cm de comprimento e 20 mm de diâmetro ligado por meio de uma conexão de PVC em formato de “L” a outro tubo de PVC de 3 cm de comprimento e 20 mm de diâmetro. O

bioadsorvente (0,5 g) foi fixado no interior do tubo de PVC com esferas e lã de vidro, formando uma segunda coluna de leito fixo, conforme ilustrado na [Figura 15](#).

**Figura 15** – Dispositivo complementar D2



**Fonte:** Autoria própria (2022).

O dispositivo complementar D3 é composto por tubos de PVC de 3 cm de comprimento e 20 mm de diâmetro fechados com *caps* (tampas) de 20 mm com furos para que seja possível o contato com a água, conforme ilustrado na [Figura 16](#). Foram utilizadas três unidades do dispositivo complementar D3, duas com 0,17 g de BAA e uma com 0,16 g de BAA, totalizando 0,50 g de BAA.

**Figura 16** – Dispositivo complementar D3



**Fonte:** Autoria própria (2022).

Os testes com os dispositivos complementares D2 ou D3, em conjunto com o dispositivo D1, foram realizados com 6 L de água natural para confirmação da hipótese de interferência dos ânions concorrentes. Os resultados mostraram uma melhoria significativa na qualidade da água tratada, alcançando níveis de arsênio de  $3 \pm 1 \mu\text{g L}^{-1}$  e  $2 \pm 1 \mu\text{g L}^{-1}$ , respectivamente. A capacidade de remoção de arsênio dos dispositivos D1 e D2 combinados foi de  $92 \pm 3 \%$ , já a combinação de D1 e D3 obteve  $95 \pm 3 \%$  de

remoção. Dessa forma, a concentração de arsênio na água alcançou o padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria GM/MS Nº 888 de 2021.

Um novo projeto de extensão em interface com a pesquisa, com as mesmas características do Projeto Interinstitucional, foi submetido para a continuidade do desenvolvimento tecnológico. O investimento em pesquisas extensionistas vem possibilitando o desenvolvimento de soluções aplicáveis e, conseqüentemente, o avanço do nível de maturidade das tecnologias, contribuindo para que o “vale da morte” possa ser transpassado. Além disso, foi estabelecida uma parceria com o município de Ouro Preto, MG, para aplicação do protótipo como MVP, conforme descrito no ANEXO II.

O conhecimento adquirido no desenvolvimento do dispositivo acoplável em filtros de barro facilitará a proposição de novas soluções com o BAA. O bioadsorvente poderá ser aplicado como etapa de polimento para remoção de arsênio, preferencialmente, em pontos de distribuição de água utilizados para a ingestão e preparo de alimentos, reduzindo os gastos com tratamento de água que será utilizada para outros fins.

#### 5.2.5. Certificação de inocuidade do bioadsorvente

Visando a realização de testes com o MVP, buscou-se a certificação do BAA pelo padrão NSF/ANSI 61 de 2016: *Drinking Water System Components - Health Effects* do Instituto de Normas Nacionais Americanas, na categoria de meios de processos de filtração (NSF, 2016). O bagaço de cana-de-açúcar, por ser um material de base biológica, pode apresentar uma carga de micronutrientes, tais como cobre, ferro, manganês e zinco (SILVA *et al.*, 2019b). Além disso, o certificado de inocuidade é exigido para a utilização de materiais no tratamento de água, por empresas de saneamento como a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

A norma estabelece os “requisitos mínimos de efeitos sobre a saúde humana para contaminantes químicos e impurezas que são indiretamente transmitidos para a água potável de produtos, componentes e materiais usados em sistemas de águas potáveis”. O material considerado inócuo não sofre lixiviação ou solubilização em contato com a água potável ou se algum contaminante e/ou impureza for lixiviado ou solubilizado para a água potável, a concentração encontrada deve ser inferior ao limite estabelecido pela norma.

O teste de inocuidade para o bioadsorvente de ânions foi realizado pela empresa Limnos Hidrobiologia e Limnologia LTDA. O laboratório responsável pelas análises é acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro (CGCRE). Os métodos empregados para quantificação dos parâmetros de inocuidade seguem os procedimentos

descritos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, em sua 23ª edição (RICE; BAIRD; EATON, 2017). Esses métodos possuem limites de quantificação abaixo dos padrões de água potável da Portaria GM/MS Nº 888 de 2021 e da NSF/ANSI 61 de 2016 e, portanto, são adequados para análise dos parâmetros de potabilidade. O material considerado inócuo mostra-se inofensivo à saúde humana.

Foram analisados os elementos inorgânicos tóxicos e realizada uma varredura dos parâmetros contidos na Portaria GM/MS Nº 888 de 2021. Utilizou-se água ultrapura para a extração de possíveis contaminantes e/ou impurezas do material, sendo que o pH foi ajustado para 5,0 com o intuito de extrair os cátions metálicos e para 8,0 visando a extração dos solventes orgânicos. O bioadsorvente foi mantido em contato com a água de extração por  $60 \pm 5$  min para a obtenção das amostras que foram coletadas e filtradas para as análises. Os resultados das análises químicas realizadas para certificação do BAA pelo padrão NSF/ANSI 61 de 2016 estão descritos no ANEXO I.

O laudo apresentado pela empresa Limnos apontou a presença de nitrato após a extração realizada com água ultrapura. A concentração encontrada foi de  $0,67 \text{ mg L}^{-1}$ , valor consideravelmente abaixo do limite de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  estabelecido pela Portaria GM/MS Nº 888 de 2021 e sem referência na NSF/ANSI 61 de 2016. Observou-se que não foram detectados metais nem compostos orgânicos na água de extração do BAA, apontando a ausência de contaminantes no bioadsorvente que pudessem ter sido lixiviados e/ou solubilizados no processo de extração. Dessa forma, a partir dos dados obtidos pelo ensaio de inocuidade, verificou-se que o BAA é um material inócuo à saúde humana.

#### 5.2.6. Descarte, recuperação e reciclagem do bioadsorvente saturado

O descarte dos resíduos gerados pelas técnicas de remoção de arsênio da água deve levar em consideração as características e a quantidade do resíduo, bem como as condições do ambiente de disposição final. Os resíduos sólidos podem ser descartados em aterros sanitários (CORNWALL, 2004), sistemas de aeração (SARKAR *et al.*, 2010) e lagoas de estabilização (KNAPPETT *et al.*, 2011; YOKOTA *et al.*, 2001).

O estado de oxidação do arsênio e dos compostos presentes no local em que o resíduo foi disposto influenciam na possibilidade de lixiviação do contaminante para o ambiente (CLANCY; HAYES; RASKIN, 2013). No Brasil, a disposição final do BAA saturado com arsênio deve ser realizada em aterro classe I (resíduo perigoso), conforme norma ABNT NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004). O risco de contaminação pelos resíduos gerados nos países em desenvolvimento é iminente, uma vez que, em muitos casos, o descarte é realizado diretamente no meio ambiente (SULLIVAN *et al.*, 2010).

A recuperação do bioadsorvente pela operação de dessorção em coluna de leito fixo é uma alternativa que possibilita a redução da quantidade de adsorvente empregado no processo de tratamento de água e efluentes ao longo do tempo. O BAA pode ser recuperado com solução aquosa de  $\text{HNO}_3$   $0,08 \text{ mol L}^{-1}$  para ser aplicado em novos ciclos de tratamento. O desempenho da operação de dessorção alcançou resultados de 95,5 % a 99,6 %, conforme apresentado na [seção 5.1.2](#).

Além da possibilidade de recuperação, o material saturado pode ser reciclado. A aplicação de adsorventes saturados como catalisadores vem sendo explorada para minimização da disposição desses materiais em aterros sanitários ([RIAL; FERREIRA, 2022](#)). Técnicas de estabilização em materiais da construção civil e a utilização de esterco de gado para transformação do arsênio na forma orgânica menos tóxica, também são opções que podem ser consideradas ([CLANCY; HAYES; RASKIN, 2013](#)).

Além disso, o uso de adsorventes saturados para a produção de cerâmica possibilita a redução dos custos de produção e a melhoria das propriedades estéticas e estruturais do produto ([VERBINNEN \*et al.\*, 2015](#)). Na indústria cimenteira, os materiais celulósicos podem ser utilizados para aumentar o desempenho mecânico do cimento, conferindo maior tenacidade, capacidade de flexão e resistência à rachaduras ao produto reforçado com fibras ([ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015](#)).

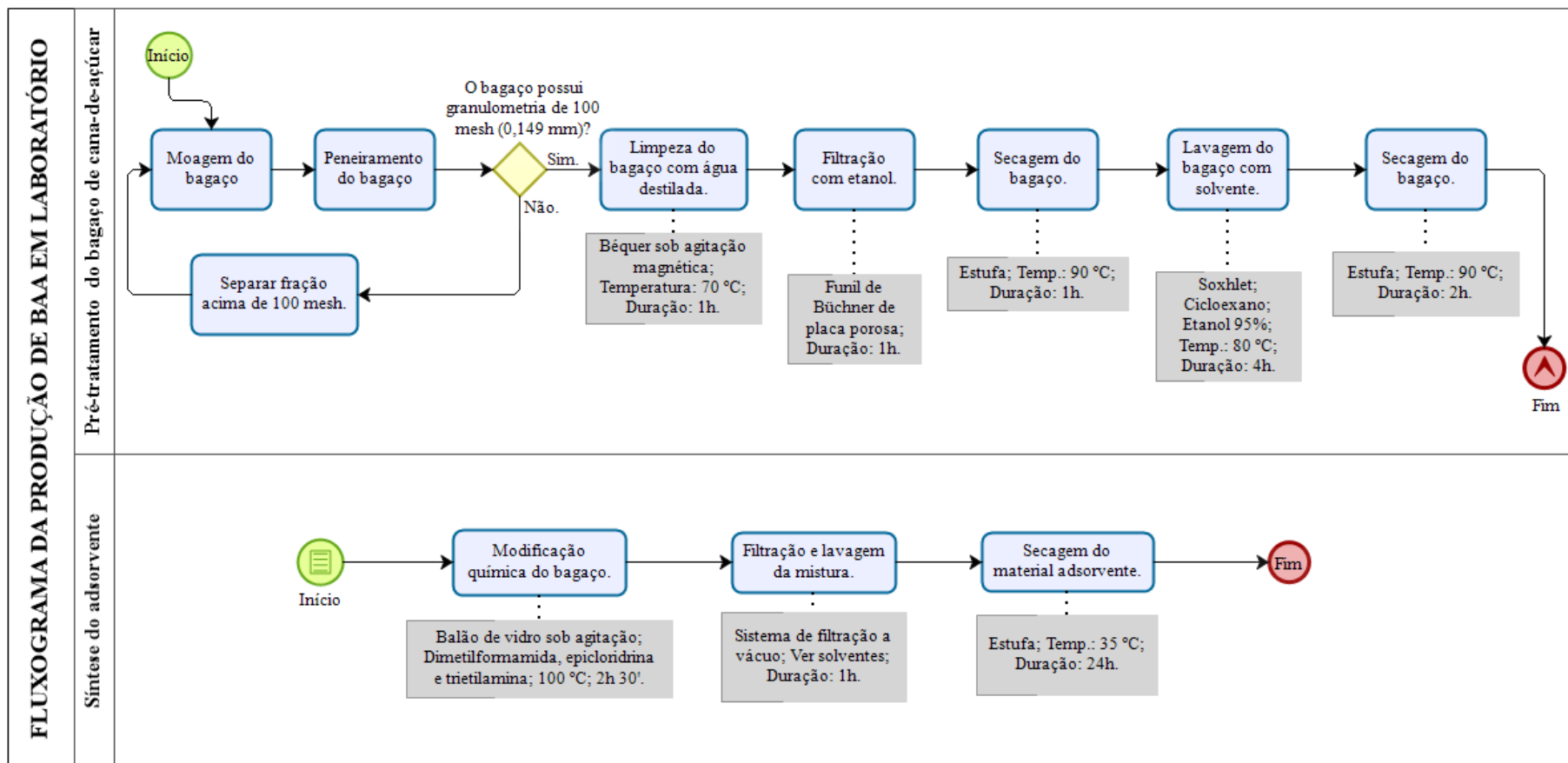
### **5.3. Análise do processo produtivo do bioadsorvente**

#### **5.3.1. Mapeamento do processo produtivo**

O processo de obtenção do BAA foi dividido em duas atividades principais: 1) pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar e 2) síntese do bioadsorvente. O pré-tratamento é realizado para a obtenção da granulometria requerida pela modificação química e limpeza do bagaço de cana-de-açúcar processado na indústria sucroalcooleira. A modificação química, por sua vez, é realizada para inclusão do grupo funcional amônio quaternário na biomassa lignocelulósica, responsável pela remoção de arsênio na operação de adsorção em meio aquoso.

O fluxograma apresentado na [Figura 17](#) mostra o processo produtivo do BAA em laboratório. Foram considerados os principais equipamentos utilizados no processo, os reagentes e solventes necessários para a realização de cada atividade, a temperatura de trabalho e a duração de cada tarefa realizada em laboratório.

Figura 17 - Fluxograma do processo de produção do bioadsorvente em laboratório





### 5.3.2. Análise preliminar de custo dos produtos químicos

A partir das quantidades de reagentes e solventes utilizados em cada atividade, foram determinadas, proporcionalmente, as quantidades de insumos necessários para síntese de 1,0 kg de material adsorvente em laboratório. A massa de bagaço de cana-de-açúcar inicial foi definida levando-se em consideração o ganho de massa de 27 %, obtido após a modificação química do BAA. O detalhamento dos custos dos reagentes e solventes utilizados nas atividades de pré-tratamento do bagaço de cana (atividade 1) e síntese do BAA (atividade 2) é apresentado na [Tabela 6](#). As atividades foram separadas para que fosse possível realizar uma análise isolada dos custos.

O custo de 1,0 kg do bioadsorvente foi calculado levando-se em consideração os reagentes de referência (Sigma-Aldrich), os demais fornecedores nacionais (ACS, Quimidrol, CRQ e EMFAL) e os custos de importação ([GOVERNO FEDERAL, 2021](#)). O cálculo do custo dos produtos comerciais foi realizado com base no menor valor encontrado nas cotações realizadas. No caso da epícloridrina, utilizou-se o valor da Sigma-Aldrich, uma vez que não foi encontrado outro fornecedor no Brasil. O valor de importação foi multiplicado pelo fator 2 com o objetivo de considerar os impostos que incidem sobre o preço do produto importado.

A produção de 1,0 g de BAA foi calculada no valor total de R\$ 75,15, R\$ 15,23 e R\$ 5,09, considerando-se os reagentes de referência, os comerciais e os de importação, respectivamente. A partir dos valores comerciais, foram identificados os produtos químicos mais representativos de cada atividade. O etanol representou 63 % do custo dos produtos químicos utilizados no pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar e o éter etílico 56 % do custo da etapa de lavagem após a modificação química. Nota-se a necessidade da busca por rotas alternativas para a obtenção da epícloridrina, uma vez que o reagente é comercializado no Brasil somente com o padrão analítico da Sigma-Aldrich, gerando um impacto de 60 % no custo dos produtos químicos empregados na síntese com os reagentes comerciais.

Modificações químicas mais simples, que podem ser encontradas em artigos e patentes de processo, podem auxiliar no desenvolvimento de materiais com menor custo. A busca por alternativas pode ser orientada para processos de modificação química dos produtos da indústria de papel e celulose, uma vez que a produção desses materiais possui similaridade com a modificação química realizada no bagaço de cana-de-açúcar para a inclusão dos grupos funcionais.



Tabela 6 – Análise preliminar de custo dos produtos químicos

Atividade 1 - Pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar													
Produto Químico	Quantidade de bagaço / g	Volume por grama / mL	Volume total / L	Preço por litro Sigma Aldrich	Preço por litro ACS	Preço por litro Quimidrol	Preço por litro CRQ	Preço por litro EMFAL	Preço por litro FOB	Custo Sigma Aldrich	Custo Produtos Comerciais	Custo Produtos Free On Board	
Cicloexano ou Éter de Petróleo	800	30,0	24	R\$ 158,95	R\$ 12,55	R\$ 95,00	R\$ 50,00	R\$ 57,93	R\$ 7,54	R\$ 3.814,80	R\$ 301,28	R\$ 180,98	
Etanol (95%)	800	50,0	40	R\$ 148,00	R\$ -	R\$ 39,53		R\$ 12,79	R\$ 13,02	R\$ 5.920,00	R\$ 511,60	R\$ 520,74	
<b>Custo da atividade 1 para produção de 1 kg de BAA</b>										<b>R\$ 9.734,80</b>	<b>R\$ 812,88</b>	<b>R\$ 701,72</b>	
Atividade 2 - Síntese do BAA (modificação química + lavagem)													
Produto Químico	Quantidade de bagaço / g	Volume por grama / mL	Volume total / L	Preço por litro Sigma Aldrich	Preço por litro ACS	Preço por litro Quimidrol	Preço por litro CRQ	Preço por litro EMFAL	Preço por litro FOB	Custo Sigma Aldrich	Custo Produtos Comerciais	Custo Produtos Free On Board	
Dimetilformamida (síntese)	800	20,0	16	R\$ 426,00	R\$ 45,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 10,18	R\$ 6.816,00	R\$ 720,00	R\$ 162,82	
Epícloridrina	800	12,8	10	R\$ 360,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 19,60	R\$ 3.686,40	R\$ 3.686,40	R\$ 200,70	
Trietilamina	800	22,0	18	R\$ 224,94	R\$ -	R\$ -	R\$ 98,00	R\$ -	R\$ 14,53	R\$ 3.959,02	R\$ 1.724,80	R\$ 255,81	
Dimetilformamida (lavagem)	1000	50,0	50	R\$ 426,00	R\$ 45,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 10,18	R\$ 21.300,00	R\$ 2.250,00	R\$ 508,82	
Ácido clorídrico (0,1mol/L)	1000	100,0	1,2	R\$ 90,00	R\$ -	R\$ 9,48	R\$ -	R\$ -	R\$ 0,92	R\$ 109,80	R\$ 11,57	R\$ 1,12	
Etanol (95%)	1000	100,0	100	R\$ 148,00	R\$ -	R\$ 39,53	R\$ -	R\$ 12,79	R\$ 13,02	R\$ 14.800,00	R\$ 1.279,00	R\$ 1.301,85	
Éter etílico	1000	50,0	50	R\$ 294,80	R\$ -	R\$ -	R\$ 95,00	R\$ -	R\$ 39,16	R\$ 14.740,00	R\$ 4.750,00	R\$ 1.958,00	
<b>Custo da atividade 2 para produção de 1 kg de BAA</b>										<b>R\$ 65.411,22</b>	<b>R\$ 14.421,77</b>	<b>R\$ 4.389,11</b>	
<b>Custo de 1 kg do BAA (atv. 1 + atv. 2)</b>										<b>R\$ 75.146,02</b>	<b>R\$ 15.234,65</b>	<b>R\$ 5.090,83</b>	
<b>Custo de 1 g do BAA (atv. 1 + atv. 2)</b>										<b>R\$ 75,15</b>	<b>R\$ 15,23</b>	<b>R\$ 5,09</b>	

Fonte: Autoria própria (2022).

### 5.3.3. Otimização do processo produtivo do bioadsorvente

O mapeamento do processo produtivo e a análise preliminar de custo dos produtos químicos empregados na produção do BAA foram fundamentais para a propositura de modificações no processo, visando a redução dos custos. Avaliou-se a possibilidade da remoção da etapa de extração em Soxhlet na atividade 1 de pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar e a possibilidade de recuperação dos solventes utilizados em todo o processo, isto é, atividades 1 e 2. Além disso, os fatores positivos e negativos da destilação da trietilamina, empregada na modificação química, foram apresentados.

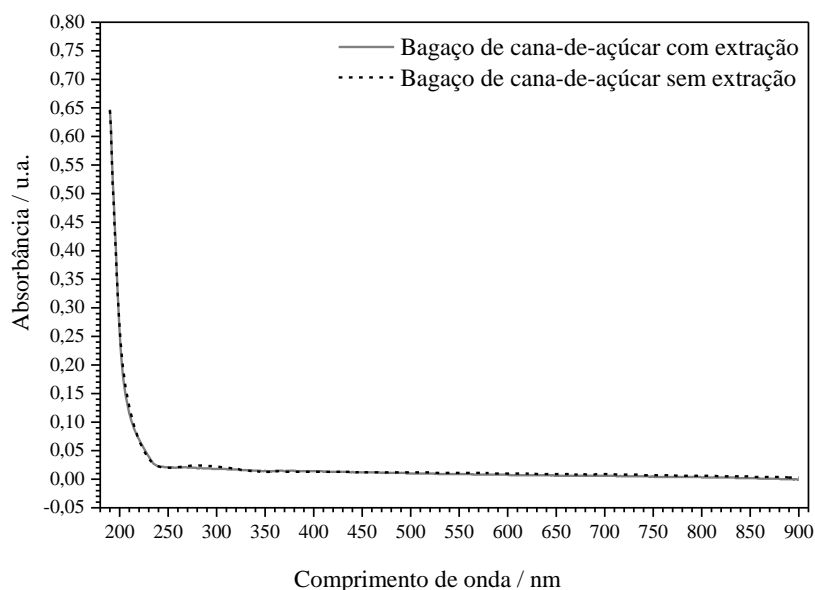
Foram produzidos dois lotes de BAA (com e sem extração) para avaliar a possibilidade de remoção da etapa de extração em Soxhlet do pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar. Utilizaram-se as mesmas condições de síntese para possibilitar a comparação dos resultados. Os materiais obtiveram ganho de massa no valor de 19,53 % e 24,87 %, e capacidade de adsorção de As(V) de  $31,5 \pm 0,4 \text{ mg g}^{-1}$  e  $33,1 \pm 0,3 \text{ mg g}^{-1}$ , com extração e sem extração, respectivamente.

A análise elementar apresentou os seguintes resultados:  $42,91 \pm 0,03 \%$  de C,  $7,5 \pm 0,1 \%$  de H, e  $1,61 \pm 0,02 \%$  de N para o material produzido sem extração e  $43,0 \pm 0,2 \%$  de C,  $7,4 \pm 0,0 \%$  de H, e  $1,45 \pm 0,01 \%$  de N para o material produzido com extração. O teor de cloro obtido para o material sem extração e com extração foi de  $4,30 \pm 0,03 \%$  e  $4,11 \pm 0,04 \%$ , respectivamente. Os teores de C, H, N e Cl, e os valores de capacidade de adsorção de As(V) para os dois materiais foram estatisticamente iguais entre si (teste *t*, 95% de confiança). Dessa forma, os resultados indicam que a modificação química foi bem-sucedida, o que demonstra, tecnicamente, a possibilidade de remoção da etapa de extração em Soxhlet do pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar.

Amostras de água do ensaio de adsorção de arsênio em batelada dos dois lotes produzidos (com e sem extração em Soxhlet) foram submetidas a uma varredura em espectrofotômetro de UV-Vis, entre 190 e 900 nm, para verificar a liberação indesejável de compostos orgânicos pelo material. Os espectros de UV-Vis são mostrados na [Figura 18](#). Verifica-se que, se essas substâncias foram liberadas, suas concentrações estão abaixo do limite de quantificação da técnica de espectrometria de absorção molecular na região do UV-Vis. Numa primeira análise, o espectro de UV-Vis mostra que o BAA, produzido sem a etapa de extração em Soxhlet, não libera concentrações apreciáveis de compostos orgânicos (ceras, terpenos, flavonoides, dentre outros) para a água submetida ao tratamento. Além disso, esses compostos podem ser extraídos do bagaço de cana-de-

açúcar pelo solvente (DMF) empregado na modificação química a 100 °C ou pelos solventes (etanol 95 % e éter etílico) utilizados nas etapas de lavagem após a síntese.

**Figura 18** – Espectro de UV-Vis após a remoção da etapa de extração em Soxhlet do pré-tratamento

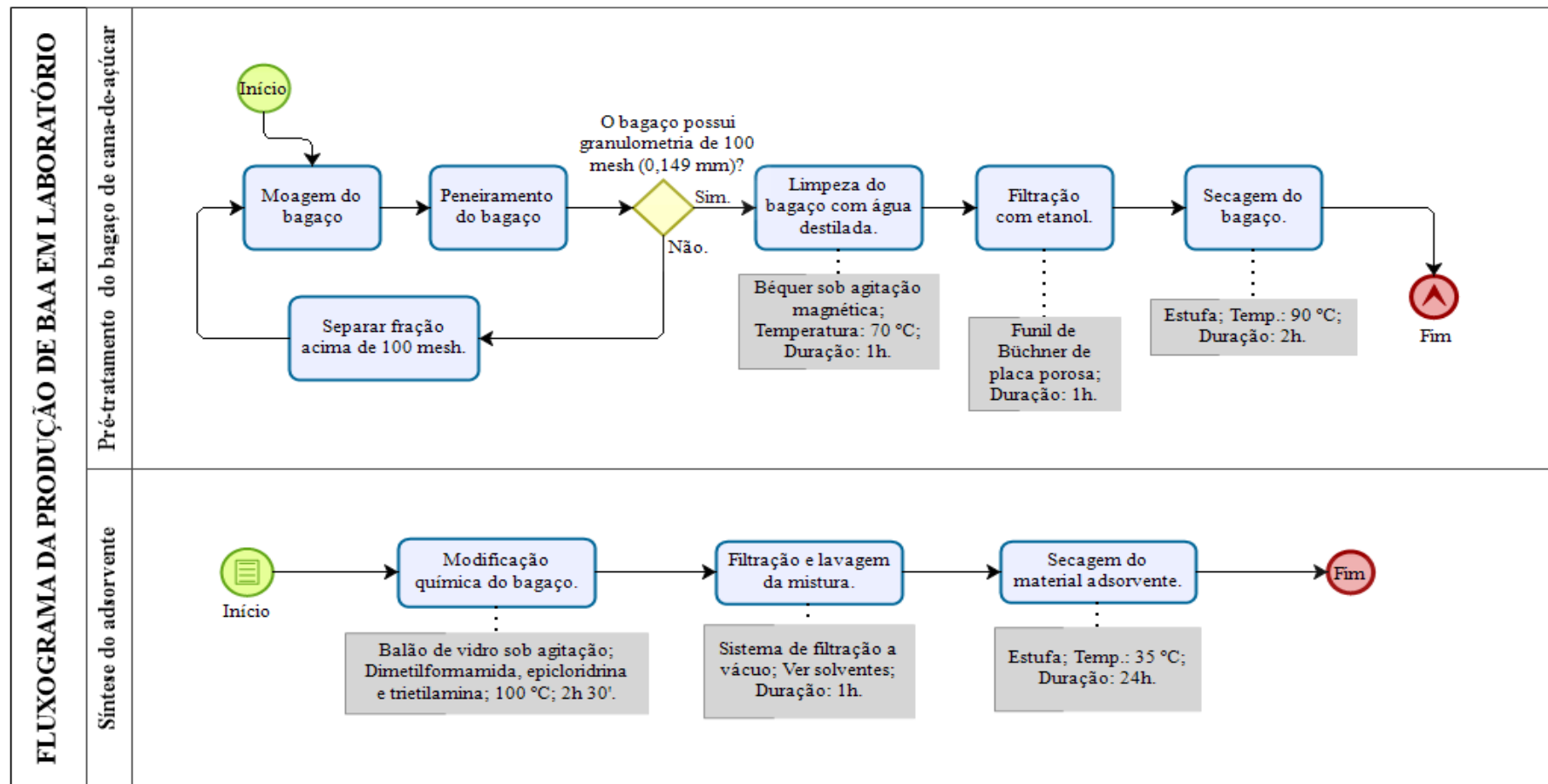


**Fonte:** Autoria própria (2022).

O fluxograma apresentado na [Figura 19](#) mostra o processo produtivo otimizado do BAA sem a etapa de extração em Soxhlet. A eliminação da operação possibilitou que as etapas de filtração e secagem, realizadas na sequência da extração, também fossem removidas. O ganho de processo representa uma redução de custo dos produtos químicos, uma vez que o cicloexano e o etanol 95 % não serão utilizados nessa etapa. Considerando a produção em larga escala, a eliminação das etapas de extração em Soxhlet, filtração e secagem representa uma redução significativa da duração da atividade de pré-tratamento e dos custos com insumos e energia, além de eliminar a necessidade de investimento em maquinário para a extração.

Outro ponto que merece atenção é a necessidade da operação de destilação da trietilamina. O reagente pode ser degradado durante o transporte e armazenamento, principalmente se houver exposição à luz. Por um lado, a utilização do reagente degradado pode interferir no desempenho da modificação química, por outro, o processo de destilação pode elevar significativamente o custo final do BAA, uma vez que a operação possui um rendimento de 60-70 %. Os lotes de BAA produzidos no presente trabalho foram preparados com amina destilada. Acredita-se que a coloração amarelada, não presente no reagente recém destilado, é um indício da sua degradação.

Figura 19 – Fluxograma do processo produtivo otimizado do bioadsorvente



Fonte: Autoria própria (2022).

#### 5.3.4. Análise de custo dos produtos químicos do processo otimizado

A remoção da operação de extração em Soxhlet apresentou uma redução de 63 % do custo da atividade de pré-tratamento, apresentado na [Tabela 7](#). Além disso, considerou-se a possibilidade de recuperação de 80 % do etanol 95 % utilizado na mesma atividade. Dessa forma, a estimativa de custo do pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar, considerando os valores dos produtos químicos comerciais, reduziu de R\$ 8,13 para R\$ 1,02 a cada 1,0 g de BAA produzido, o que representa uma redução de 87 % da avaliação inicial.

A implementação da recuperação de 80 % dos solventes (etanol, DMF e éter etílico), utilizados na operação de lavagem após a modificação química, reduziu a estimativa de custo total da atividade em 46 %, considerando os valores dos produtos comerciais. Para cada 1,0 g de BAA produzido, o custo estimado reduziu de R\$ 144,22 para R\$ 77,99. Avaliando-se todo o processo produtivo do BAA (pré-tratamento e síntese), o valor da produção de cada 1,0 g de BAA reduziu de R\$ 15,23 para R\$ 7,90, o que representa uma redução total de 48 % (valores comerciais).

Deve-se verificar a viabilidade da recuperação dos solventes e a possibilidade de utilização de sistemas trocadores de calor para aproveitamento da energia térmica para aquecimento da água utilizada na lavagem. Além disso, a redução das quantidades dos reagentes na produção em maior escala, especialmente nas etapas de lavagem (pré-tratamento e síntese), será avaliada.

**Tabela 7** – Análise de custo dos produtos químicos do processo otimizado

Atividade 1 - Pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar													
Produto Químico	Quantidade de bagaço / g	Volume por grama / mL	Volume total / L	Preço por litro Sigma Aldrich	Preço por litro ACS	Preço por litro Quimidrol	Preço por litro CRQ	Preço por litro EMFAL	Preço por litro FOB	Custo Sigma Aldrich	Custo Produtos Comerciais	Custo Produtos Free On Board	
Etanol (95%)	800	50,0	40	R\$ 148,00	R\$ -	R\$ 39,53	R\$ -	R\$ 12,79	R\$ 13,02	R\$ 1.184,00	R\$ 102,32	R\$ 104,15	
<b>Custo da atividade 1 para produção de 1 kg de BAA</b>										<b>R\$ 1.184,00</b>	<b>R\$ 102,32</b>	<b>R\$ 104,15</b>	
Atividade 2 - Síntese do BAA (modificação química + lavagem)													
Produto Químico	Quantidade de bagaço / g	Volume por grama / mL	Volume total / L	Preço por litro Sigma Aldrich	Preço por litro ACS	Preço por litro Quimidrol	Preço por litro CRQ	Preço por litro EMFAL	Preço por litro FOB	Custo Sigma Aldrich	Custo Produtos Comerciais	Custo Produtos Free On Board	
Dimetilformamida	800	20,0	16	R\$ 426,00	R\$ 45,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 10,18	R\$ 6.816,00	R\$ 720,00	R\$ 162,82	
Epicloridrina	800	12,8	10	R\$ 360,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 19,60	R\$ 3.686,40	R\$ 3.686,40	R\$ 200,70	
Trietilamina	800	22,0	18	R\$ 224,94	R\$ -	R\$ -	R\$ 98,00	R\$ -	R\$ 14,53	R\$ 3.959,02	R\$ 1.724,80	R\$ 255,81	
Dimetilformamida (lavagem)	1000	50,0	50	R\$ 426,00	R\$ 45,00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 10,18	R\$ 4.260,00	R\$ 450,00	R\$ 101,76	
Ácido clorídrico (0,1mol/L)	1000	100,0	1,2	R\$ 90,00	R\$ -	R\$ 9,48	R\$ -	R\$ -	R\$ 0,92	R\$ 109,80	R\$ 11,57	R\$ 1,12	
Etanol (95%)	1000	100,0	100	R\$ 148,00	R\$ -	R\$ 39,53	R\$ -	R\$ 12,79	R\$ 13,02	R\$ 2.960,00	R\$ 255,80	R\$ 260,37	
Éter etílico	1000	50,0	50	R\$ 294,80	R\$ -	R\$ -	R\$ 95,00	R\$ -	R\$ 39,16	R\$ 2.948,00	R\$ 950,00	R\$ 391,60	
<b>Custo da atividade 2 para produção de 1 kg de BAA</b>										<b>R\$ 24.739,22</b>	<b>R\$ 7.798,57</b>	<b>R\$ 1.374,18</b>	
<b>Custo de 1 kg do BAA (atv. 1 + atv. 2)</b>										<b>R\$ 25.923,22</b>	<b>R\$ 7.900,89</b>	<b>R\$ 1.478,33</b>	
<b>Custo de 1 g do BAA (atv. 1 + atv. 2)</b>										<b>R\$ 25,92</b>	<b>R\$ 7,90</b>	<b>R\$ 1,48</b>	

**Fonte:** Autoria própria (2022).

### 5.3.5. Validação do processo produtivo do bioadsorvente

A validação do processo produtivo foi realizada por meio da comparação entre os resultados obtidos pela produção de seis novos lotes de BAA com as especificações determinadas pelo desenvolvimento do bioadsorvente. O estudo avaliou a consistência (repetibilidade e reprodutibilidade) da produção do BAA, considerando o cumprimento das especificações pré-definidas de qualidade e desempenho.

Os principais aspectos do processo, quais sejam, máquina, materiais, mão de obra, meio ambiente, método e medição, também conhecido como 6Ms, foram observados durante o estudo para mitigação do risco de variação dos resultados. Os novos lotes foram identificados por códigos no formato x.x-xxxxxx-xx, que representa o N° da batelada (x.x), a data da síntese (xxxxxx) e a quantidade arredondada de BAA produzida (xx).

Após a produção dos lotes, a caracterização foi realizada pela determinação do ganho de massa, capacidade de adsorção de arsênio no equilíbrio ( $q_e$ ), teor de cloro e de C, H e N, para comparação com os valores do lote de referência, conforme apresentados na [Tabela 8](#).

**Tabela 8** – Caracterização dos lotes produzidos para validação do processo

Lote	Ganho de massa / %	C / %	H / %	N / %	Cl / %	$q_e$ / mg g <sup>-1</sup>
1.1-191121-08	22,09	43,67 ± 0,03	7,04 ± 0,04	1,54 ± 0,06	3,88 ± 0,01	38,0 ± 0,5
1.2-191121-09	23,58	44,5 ± 0,1	7,1 ± 0,2	2,0 ± 0,1	3,7 ± 0,2	35,0 ± 0,8
2.1-241121-14	21,08	45,7 ± 0,1	7,20 ± 0,04	1,73 ± 0,06	3,5 ± 0,1	33,4 ± 0,2
2.2-241121-13	20,21	45,3 ± 0,1	7,2 ± 0,2	1,83 ± 0,07	3,35 ± 0,03	33,2 ± 0,6
3.1-251121-15	25,68	45,6 ± 0,2	7,1 ± 0,1	1,80 ± 0,04	3,47 ± 0,01	33,3 ± 0,5
3.2-251121-13	23,47	44,48 ± 0,08	7,16 ± 0,08	1,5 ± 0,3	3,34 ± 0,04	32,26 ± 0,04
Média dos lotes	23 ± 2	44,9 ± 0,8	7,12 ± 0,06	1,7 ± 0,2	3,5 ± 0,2	34 ± 2
BAA referência	27,78	44,9 ± 0,1	6,78 ± 0,06	1,49 ± 0,01	4,18 ± 0,01	27,3 ± 0,9

**Fonte:** Aatoria própria (2022).

A capacidade de adsorção média de arsênio foi 25,5 % superior ao resultado obtido pelo material de referência. Apesar da aparente redução no ganho de massa, a capacidade de adsorção ( $q_e$ ) mostra que os lotes produzidos apresentaram desempenho satisfatório para a remoção de arsênio.

Os teores de H e N dos materiais dos seis lotes produzidos foram estatisticamente iguais aos teores de H e N do BAA de referência. Os teores de C e os valores de  $q_e$  de As(V) de todos os lotes, exceto o lote 1, foram estatisticamente iguais ao teor de C e ao valor de  $q_e$  de As(V) do BAA de referência. Os teores de Cl dos lotes 1, 2 e 3 foram estatisticamente iguais ao teor de Cl do BAA de referência. Ainda que haja algumas diferenças nos teores de alguns elementos em relação aos teores do material de referência, essas diferenças foram consideradas aceitáveis uma vez que, em quase todos os lotes, as capacidades de adsorção de As(V) foram estatisticamente iguais à do material BAA de referência. Esses resultados sugerem que a validação do processo possibilita seguir com maior segurança para o aumento de escala do processo produtivo do BAA.

#### 5.3.6. Disponibilidade dos produtos químicos e química verde

A consulta ao *website* da ABIQUIM revelou que os produtos químicos necessários para a síntese do BAA (DMF, epicloridrina, trietilamina) não são produzidos no Brasil para uso industrial. A dependência brasileira da importação de insumos químicos é um dos assuntos considerados pelo “Movimento Química Pós 2022”. Um dos pilares estabelecidos pela SBQ no movimento está relacionado à busca pela soberania do país para a produção da indústria química nacional (SILVA *et al.*, 2022).

Os produtos utilizados no pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar e após a modificação química (etanol, ácido clorídrico e éter etílico) são produzidos por empresas como Braskem, Rhodia Brasil, Oxiteno e Dow Brasil (ABIQUIM, 2021). Além disso, alguns reagentes e solventes empregados na produção de BAA, tais como epicloridrina, trietilamina, etanol e éter etílico, podem ser obtidos a partir de matéria-prima renovável.

A empresa belga Solvay vem utilizando a glicerina derivada de óleo vegetal como matéria-prima para produção de epicloridrina, substituindo o propileno de origem petroquímica (SOLVAY, 2015). No Brasil, a glicerina é gerada em larga escala como subproduto da produção do biodiesel. Não existem informações disponíveis na Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ) da epicloridrina sobre a sua degradação e persistência ambiental (LABSYNTH, 2017a).

A empresa alemã BASF possui patentes depositadas nos escritórios da Europa (EP2782898B1), África do Sul (ZA201404497B) e China (CN103946208B) com o método de produção de trietilamina utilizando bioetanol e amônia como matéria-prima. Além da rota de produção verde, a trietilamina possui degradabilidade > 90 %, sendo considerado um reagente facilmente eliminável (MULTICHEMIE, 2011).



A despeito da produção da DMF por fontes não renováveis, o solvente apresenta degradabilidade > 90 %, além de não ser bioacumulável ([QUÍMICA MODERNA, 2012](#)). Além disso, o produto pode ser recuperado por destilação fracionada para reutilização em outras sínteses de BAA.

A produção de etanol pode ser realizada a partir da fermentação da glicose (sacarose) extraída da cana-de-açúcar, sendo um solvente com biodegradabilidade > 94 %, facilmente biodegradável ([LABSYNTH, 2017b](#)). Já o éter etílico pode ser obtido a partir do etanol e, embora possa ser produzido a partir de fonte renovável, o solvente apresenta baixa biodegradabilidade ([LABSYNTH, 2017c](#)). O bagaço de cana-de-açúcar gerado como subproduto da produção de etanol e uma possível produção de éter etílico é utilizado para a produção de BAA.

Considerando a possibilidade de recuperação dos solventes e de obtenção dos produtos químicos a partir de fontes renováveis, a rota de síntese empregada para produção do BAA vai ao encontro do movimento global relacionado à economia circular e dos princípios da bioeconomia.

#### 5.3.7. Controle e fiscalização dos produtos químicos

A legislação de produtos controlados pela Polícia Federal e pelo Exército brasileiro foi consultada para identificar a necessidade de trâmites especiais para a obtenção e utilização dos reagentes e solvente no preparo da tecnologia.

O *website* da Polícia Federal, na subseção Produtos Químicos, descreve como obter cadastramento e licença para controle de produtos químicos ([POLÍCIA FEDERAL, 2020](#)). O aparato legislativo conta com a Lei N° 10.357 de 2001 que estabelece normas de controle e fiscalização sobre produtos químicos controlados e a Portaria N° 240 de 2019 que estabelece os procedimentos para fiscalização e controle, e define os produtos químicos sujeitos ao controle pela Polícia Federal ([BRASIL, 2001; MINISTÉRIO DA JUSTIÇA E SEGURANÇA PÚBLICA, 2019](#)).

Apesar do processo de preparo da tecnologia utilizar produtos químicos controlados pela Polícia Federal, quais sejam, éter etílico, ácido clorídrico e álcool etílico, a tecnologia se enquadra no Artigo 57 da Portaria N° 240 de 2019 que apresenta os produtos formulados com substância química isenta de controle ([MINISTÉRIO DA JUSTIÇA E SEGURANÇA PÚBLICA, 2019](#)). O inciso III do Artigo 57 da Portaria N° 240 de 2019 trata dos produtos saneantes, definidos pela Portaria, como substâncias ou preparações destinadas à higienização no tratamento de água. Sendo assim, a produção

do bioadsorvente de elementos químicos não demanda a licença para compra, uso e armazenamento desses produtos (MINISTÉRIO DA JUSTIÇA E SEGURANÇA PÚBLICA, 2019).

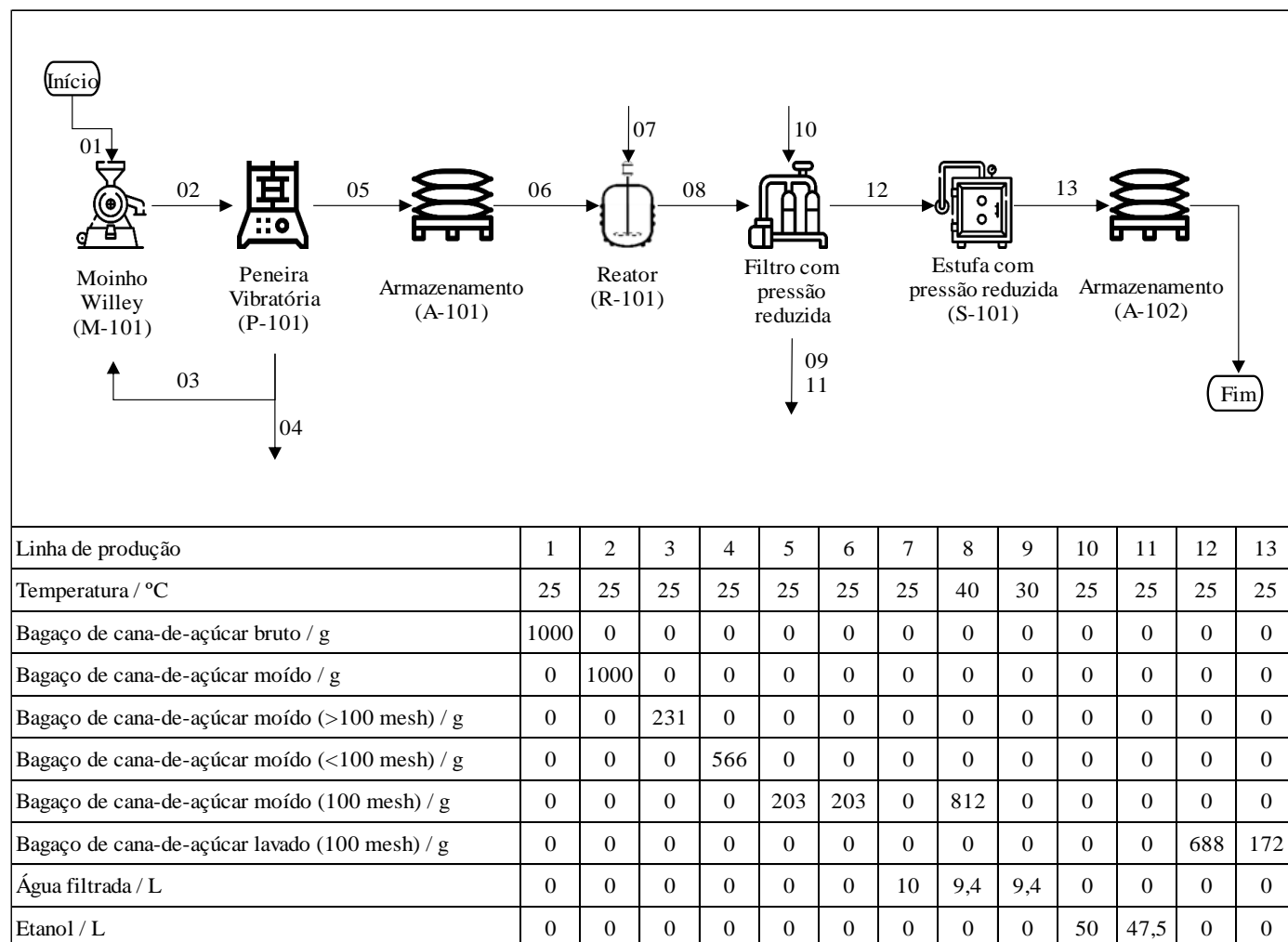
O *website* do Exército conta com informações relevantes para a obtenção do registro de atividades com produtos controlados. São descritos os procedimentos para a obtenção ou revalidação do registro, bem como os trâmites relacionados à importação dos produtos controlados (EXÉRCITO BRASILEIRO, 2021). Destacam-se três normativas principais para a autorização da importação e uso desses produtos: a Portaria N° 5-D LOG de 2005, que normatiza a concessão e reavaliação dos registros das atividades com produtos controlados, a Portaria N° 56 – COLOG de 2017, que dispõe sobre os procedimentos administrativos necessários para o registro de atividades com produtos controlados e a Portaria N° 118 – COLOG de 2019, que descreve a lista de produtos controlados pelo Exército brasileiro (EXÉRCITO BRASILEIRO, 2005, 2017, 2019). Verificou-se que nenhum produto utilizado no processo de produção do BAA é controlado pelo Exército (EXÉRCITO BRASILEIRO, 2019).

#### 5.3.8. Planta piloto de laboratório para produção do bioadsorvente

Os equipamentos necessários para a produção em maior escala foram identificados para a elaboração dos diagramas de blocos do processo produtivo do BAA. Foi possível substituir os principais equipamentos utilizados em pequena escala por máquinas similares ao processo industrial, o que permitiu avançar com o planejamento do aumento de escala em uma planta piloto de laboratório.

O balanço de massa permite identificar as entradas e saídas de materiais, reagentes e solventes em cada etapa do processo, bem como a necessidade de armazenamento de determinados insumos e a retroalimentação necessária em determinadas atividades. A primeira atividade, ilustrada na [Figura 20](#), consiste no pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar. Considerou-se a possibilidade do aproveitamento da fração de bagaço menor que 100 mesh para retornar ao processo de moagem. Além disso, o balanço de massa levou em consideração a recuperação de 95 % do etanol para utilização na etapa de lavagem da síntese do bioadsorvente e uma retenção de líquido pelo bagaço de cana de 75 % da massa em base úmida, ou seja, cada 100 g de bagaço de cana-de-açúcar após as etapas de separação sólido-líquido, equivale a 25 g de bagaço de cana em base seca.

Figura 20 – Balanço de massa da atividade de pré-tratamento



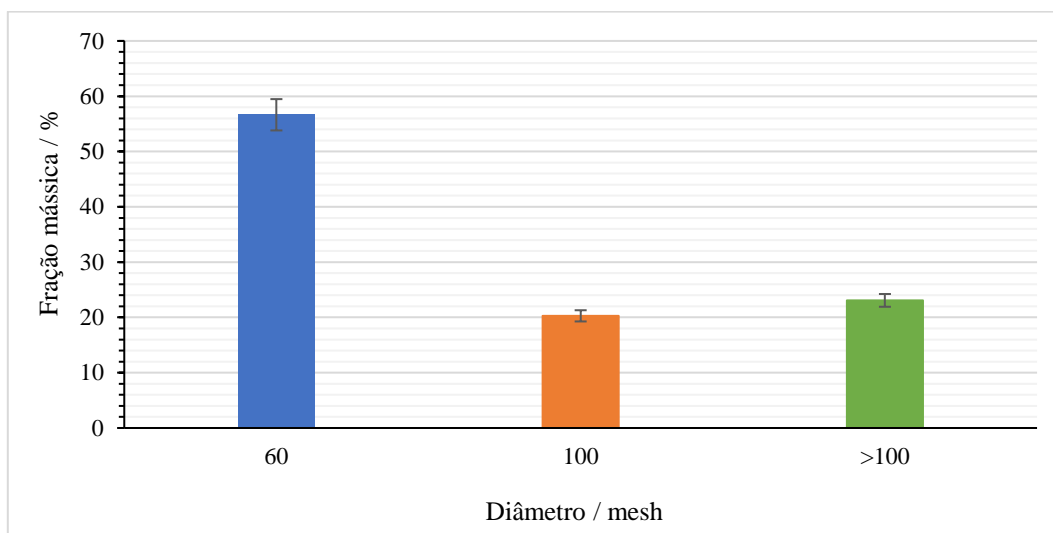
Fonte: Autoria própria (2022).

O bagaço de cana-de-açúcar foi processado em moinho de facas do tipo Willey (M-101) e seguiu para a seleção da granulometria de 100 mesh (0,149 mm) em sistema de agitação magnética com peneira vibratória (P-101). A fração com granulometria acima da especificação (< 100 mesh) retornou para a etapa de moagem. Os moinhos que possuem maior precisão de ajuste das facas são capazes de obter desempenho superior.

A distribuição granulométrica foi realizada com peneiras de 60 e 100 mesh, sendo o fundo do sistema representado pela fração maior do que 100 mesh, conforme representado na Figura 21. O processo moagem-peneiramento apresentou rendimento de 47 %. Para cada 10 g de bagaço de cana-de-açúcar obtido com granulometria de 100 mesh (0,149 mm), foram gerados 11,4 g de bagaço de cana com granulometria inferior a 0,149 mm, ou seja, > 100 mesh, não aproveitáveis para o processo de modificação química.

A fração não aproveitável pode ser utilizada para cogeração de bioenergia (eletricidade e vapor) em um sistema combinado de calor e potência (eletricidade), conforme descrito por [Adarme \(2020\)](#), para uma unidade de produção de BAA quando esta estiver integrada à uma planta de biorrefinaria de 1<sup>a</sup> e/ou 2<sup>a</sup> geração ou por meio da venda do bagaço de cana não aproveitável no processo de produção de BAA, quando esta não estiver integrada à uma biorrefinaria.

**Figura 21** – Gráfico da distribuição granulométrica do bagaço de cana-de-açúcar



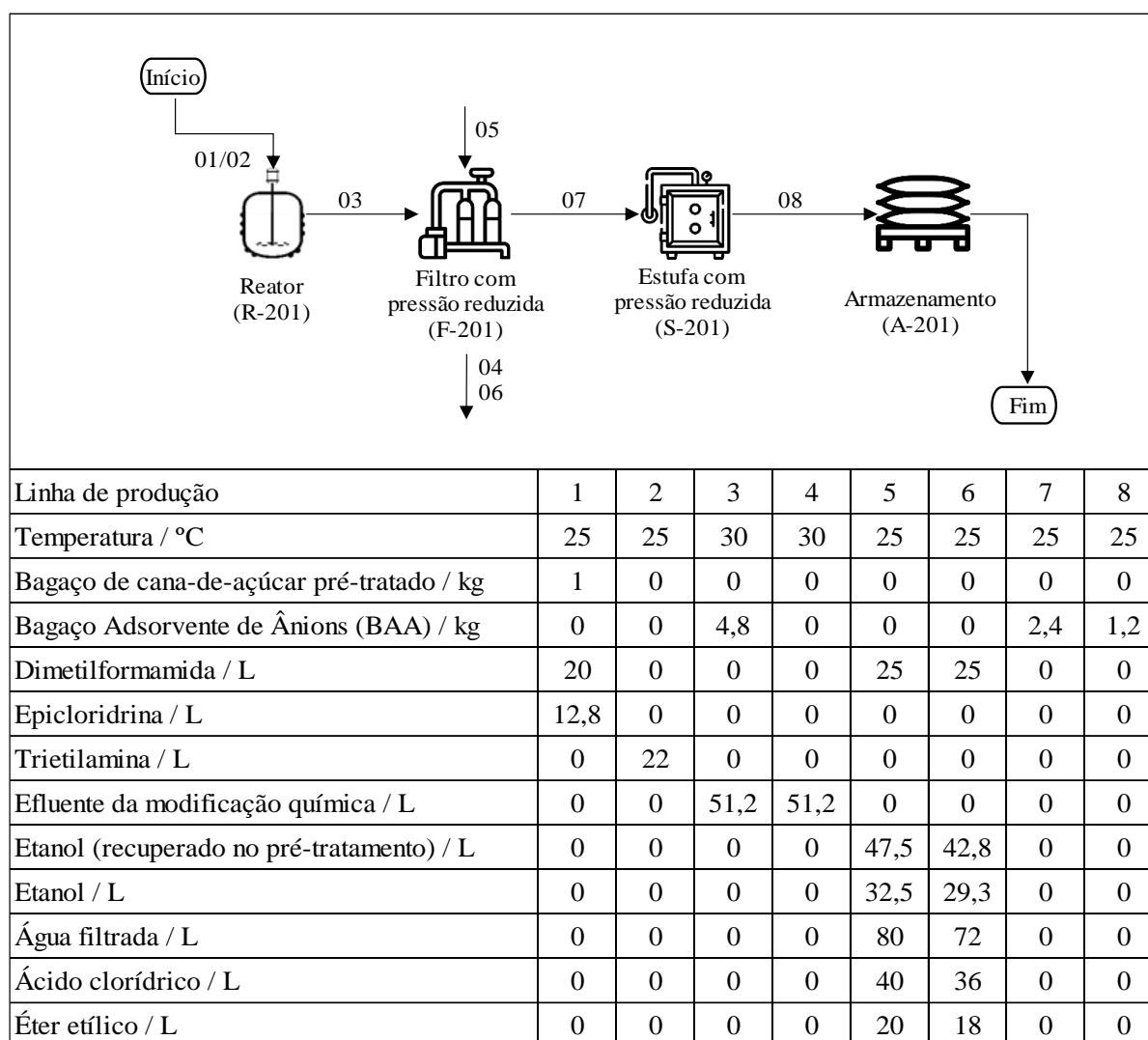
**Fonte:** Autoria própria (2022).

A fração de 100 mesh do bagaço de cana-de-açúcar foi lavada no reator (R-101) por 60 min, com água sob agitação constante a 70 °C. Durante a etapa de filtração com pressão reduzida (F-101), a biomassa foi lavada com etanol 95 % e submetida à secagem em estufa sob pressão reduzida (S-101) a 90 °C por 60 min. Após a lavagem do bagaço de cana, observou-se uma redução de 15,5 % de sua massa, resultado da remoção de açúcares residuais e outras impurezas advindas do processamento da cana-de-açúcar na indústria sucroalcooleira. O pré-tratamento do bagaço de cana visou solubilizar os açúcares residuais e outras impurezas que poderiam prejudicar o rendimento da rota de síntese proposta, possibilitando a transformação do subproduto em um bioadsorvente por meio de sua modificação química.

A segunda atividade, ilustrada na [Figura 22](#), representa a síntese do BAA. Considerou-se uma retenção de líquido pelo bagaço de cana-de-açúcar de 75 % da massa em base úmida para o efluente e 50 % para o éter etílico. Além disso, o balanço de massa levou em consideração a recuperação de 90 % dos solventes utilizados. A modificação química do bagaço de cana foi realizada em reator (R-201) por meio de uma reação one-pot, em duas etapas, com temperatura de trabalho de 100 °C, duração total de 150 min e

agitação constante. Inicialmente, adicionou-se no sistema o bagaço de cana previamente processado e os reagentes DMF e epicloridrina. Após 30 min de reação, adicionou-se a trietilamina e a reação prosseguiu por mais 120 min. Para cada grama de bagaço de cana, foram adicionados 20,0 mL de DMF, 13,0 mL de epicloridrina e 22,0 mL de trietilamina (MAIA, 2020). A produção foi realizada partindo-se de 40,9 g de bagaço de cana-de-açúcar para avaliar o desempenho do processo no reator de aço inoxidável 304 de 16 L e, conseqüentemente, o aumento da escala de produção do bioadsorvente.

**Figura 22** – Balanço de massa da atividade de síntese do bioadsorvente



**Fonte:** Autoria própria (2022).

A modificação química, etapa crítica da atividade 2, foi realizada em um reator de aço inoxidável 304, conforme apresentado na Figura 23. O reator de aço inox utilizado na planta piloto possui capacidade de 16 L, sistema de agitação mecânica com impulsor de âncora, utilizado para mistura de fluidos muito consistentes e hastes de aço fixas em torno do sistema de agitação para evitar que alguns elementos do fluido tenham um

regime de escoamento muito maior do que outros, o que ocasionaria curto-circuito e a formação de zonas “mortas” ou de estagnação dentro do reator.

O reator possui aquecimento por resistência que permite alcançar uma temperatura de trabalho de até 130 °C, controle de temperatura por termostato e resfriamento por serpentina. Além disso, o equipamento conta com um sistema de condensação para refluxo dos reagentes e dispositivos para adição de sólidos e líquidos sem a necessidade de interrupção do processo produtivo.

**Figura 23** – Reator de aço inoxidável 304 utilizado no aumento de escala do bioadsorvente



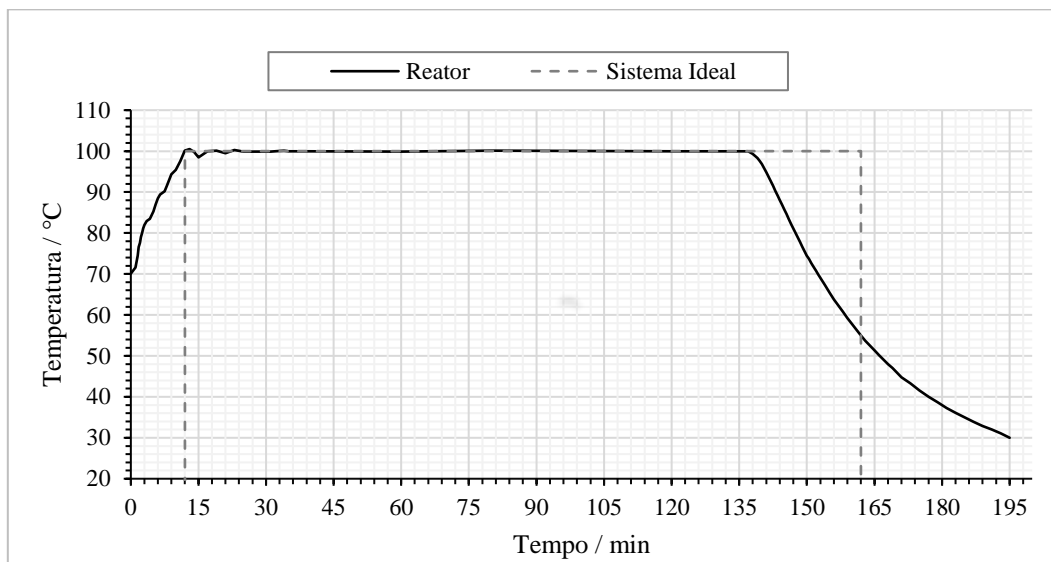
**Fonte:** Autoria própria (2022).

A operação no reator foi realizada com capacidade reduzida. Foram utilizados 820 mL de DMF, 520 mL de epiclorigrina e 900 mL de trietilamina, totalizando 2,24 L de reagente, o que representa 14 % de sua capacidade total ou 20% de sua capacidade líquida. Recomenda-se que o equipamento seja operado com capacidade líquida de até 70 % para que o risco de acidente seja mitigado. Considerando-se as quantidades de reagentes empregados na produção de BAA, é possível a produção máxima de 250 g do bioadsorvente, operando o reator com 70 % de sua capacidade nominal. A agitação mecânica foi ajustada para 120 rpm. Observou-se que o sistema de agitação mecânica favoreceu a operação, uma vez que a agitação magnética realizada com o balão de vidro sofre interferência ao longo da modificação química pelo aumento da viscosidade do meio reacional com o tempo de reação.

A temperatura foi acompanhada ao longo do processo de modificação química. O gráfico, representado na [Figura 24](#), apresenta a variação de temperatura ideal (linha tracejada) durante os 150 min de reação a 100 °C e o comportamento obtido pelo reator (linha contínua). Nota-se que houve uma variação em torno de 100 °C nos minutos iniciais

da reação, resultado da estabilização da temperatura pelo reator. Optou-se por iniciar a operação de resfriamento por serpentina, com água a temperatura ambiente, após 125 min do início da reação a 100 °C, uma vez que a reação continua ocorrendo durante a queda da temperatura. Dessa forma, calculou-se a área dos gráficos para verificar a variação entre o processo realizado no reator e o sistema ideal.

**Figura 24** – Gráfico da temperatura do reator na produção do bioadsorvente



**Fonte:** Autoria própria (2022).

Foi calculada a área do gráfico do sistema ideal, representada pelo retângulo de linha tracejada que apresenta a variação de 0 a 100 °C, com aumento e redução da temperatura de forma imediata e duração de 150 min. Já a área do gráfico do reator (Figura 24) foi calculada pelo somatório da área do retângulo formado pela temperatura de 100 °C, com início em 12 min e fim em 137 min de operação, com a área abaixo da curva de resfriamento, entre 138 e 195 min, obtida pelo editor de planilhas Excel e calculada a partir da integral representada na Equação (10).

$$\int_{138}^{195} 0,0204x^2 - 8,0181x + 817,76 \quad \text{Equação (10)}$$

A área do gráfico do sistema ideal foi de 15.000, e a do gráfico do reator foi de 15.066,80. A variação entre os sistemas foi de 0,45 %, o que confirma a adequação do resfriamento realizado no reator em comparação com sistema ideal estabelecido pelo desenvolvimento inicial do processo de obtenção do BAA.

Após a modificação química, foi realizada a filtração do bagaço de cana modificado quimicamente (obtido da etapa anterior) sob pressão reduzida (F-201). O BAA com resíduos do processo de modificação química foi lavado durante a filtração



com DMF, etanol 95 %, água, solução de HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup> e éter etílico, para que os reagentes utilizados fossem totalmente removidos do material. O bagaço de cana modificado e lavado seguiu para a secagem em estufa sob pressão reduzida (S-201) a 35 °C, finalizando o processo de obtenção do bioadsorvente. Uma comparação dos parâmetros obtidos pelo bioadsorvente produzido no reator com o BAA de referência é apresentada na [Tabela 9](#).

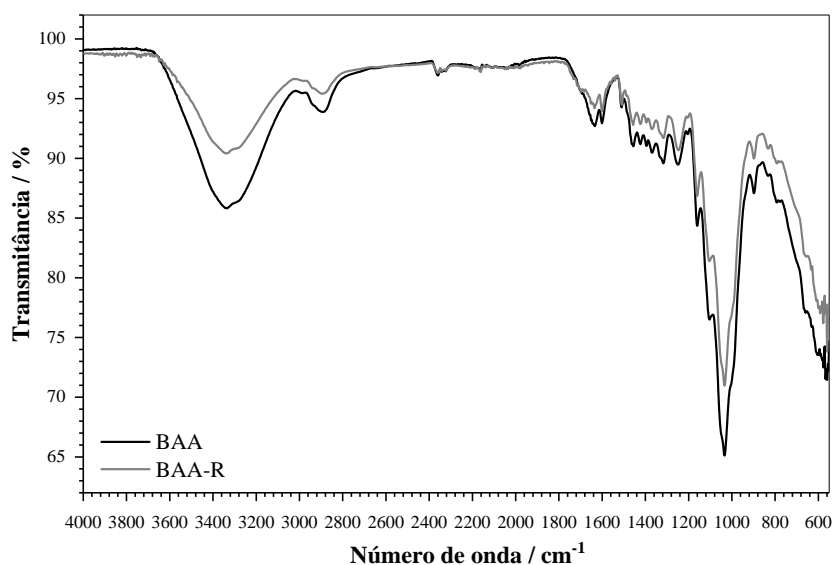
**Tabela 9** – Caracterização do lote produzido no reator de aço inoxidável 304

Material	Ganho de massa / %	C / %	H / %	N / %	Cl / %	$q_e$ / mg g <sup>-1</sup>
BAA Reator	20,47	46,0 ± 0,2	6,8 ± 0,1	1,22 ± 0,02	3,89 ± 0,06	19 ± 2
BAA Referência	27,78	44,9 ± 0,1	6,78 ± 0,06	1,49 ± 0,01	4,18 ± 0,01	27,3 ± 0,9

**Fonte:** Autoria própria (2022).

A redução do teor de nitrogênio do bioadsorvente produzido no reator de aço inox, e conseqüentemente, da quantidade dos grupos funcionais amônio quaternário na estrutura do BAA, justifica a redução na capacidade de adsorção de arsênio do material. Apesar disso, o teor de cloro mostra que a etapa de introdução da epícloridrina apresentou resultados satisfatórios, corroborando a necessidade de ajustes na etapa de aminação do bioadsorvente. Foi realizada a comparação entre os espectros de FTIR do bioadsorvente de referência (BAA) e do produzido no reator (BAA-R), conforme apresentado na [Figura 25](#).

**Figura 25** – Espectro no infravermelho (FTIR) do bioadsorvente



**Fonte:** Autoria própria (2022).



A análise dos espectros permitiu a comparação das bandas do bioadsorvente referência (BAA) com as bandas do bioadsorvente produzido no reator de aço inox (BAA-R), conforme apresentado na [Tabela 10](#). As bandas em 2890-2895 e 1456  $\text{cm}^{-1}$  estão associadas às vibrações de estiramento e de deformação, respectivamente, dos grupos  $\text{C}(2\text{sp}^3)\text{-H}$  da celulose, hemiceluloses e lignina contidos na própria estrutura do bagaço de cana, além dos grupos introduzidos pela modificação do bagaço de cana com EPI e TEA.

A modificação química do BC com EPI e TEA é observada com mais clareza pelo aparecimento das bandas em 1248-1250, 1161 e 1034  $\text{cm}^{-1}$  nos espectros do BAA e BAA-R, referentes à vibração de estiramento e deformação, respectivamente, da ligação C–N dos grupos amônio quaternário e da banda em 791-792  $\text{cm}^{-1}$ , correspondente ao estiramento da ligação C–Cl na fração de EPI ligada covalentemente ao BC. Dessa forma, o espectro confirma que a modificação química no reator de aço foi bem-sucedida.

**Tabela 10** - Descrição das bandas dos espectros FTIR do BAA e BAA-R

Grupos químicos	Número de onda / $\text{cm}^{-1}$	BAA	BAA-R
Estiramento da ligação O–H		3335	3340
Estiramento da ligação C–H alifático		2891	2893
Vibração da ligação C=C		1600	1600
Deformação da ligação C–H em carbonos primários e secundários		1456	1456
Estiramento da ligação C–N de amina alifática		1250	1248
Deformação da ligação C–N de amina alifática		1161	1161
Estiramento assimétrico da ligação C–N–C		1034	1034
Estiramento da ligação C–Cl		792	791

**Fonte:** Autoria própria (2022).

As melhorias operacionais identificadas no reator de aço inox podem contribuir para que a produção do BAA seja otimizada e o desempenho do bioadsorvente seja mais promissor. Devem-se considerar os seguintes fatores: *i*) o tipo de fundo do reator (não abaulado como um balão de fundo redondo de vidro) que provavelmente interferiu na transferência de massa e de calor e, conseqüentemente, na homogeneidade do meio reacional, sendo necessária a determinação do regime de fluxo no reator por meio de ensaios com traçador; *ii*) a falta de vedação do funil de adição de sólidos que provavelmente contribuiu para que os reagentes orgânicos higroscópicos entrassem em contato com a umidade do ar, o que prejudica a etapa de modificação química; *iii*) o reator

foi operado com 14 % do seu volume total e com a pá de agitação mecânica parcialmente submersa no meio reacional, dificultando o controle de temperatura e de agitação antes que todos os reagentes fossem adicionados.

A síntese realizada no reator possibilitou identificar a necessidade do aumento da velocidade de agitação, em comparação aquela usada no balão de fundo redondo de vidro, para superar a formação de zonas “mortas” ou de estagnação onde há o encontro da parede do reator com o fundo. A hidrodinâmica resultante da agitação por impulsor de âncora possui efeitos diferentes da agitação magnética realizada no balão de vidro. O aumento da velocidade de agitação e do volume utilizado no reator pode contribuir com uma melhor transferência de massa e de calor e, conseqüentemente, com uma maior homogeneidade do meio reacional.

O funil de adição de sólidos será substituído após a adição do bagaço de cana-de-açúcar por uma peça que será responsável por garantir a vedação do sistema, evitando a absorção da umidade do ar pelos reagentes. Recomenda-se a lavagem do reator com etanol hidratado (95 %) após a síntese para reduzir a possibilidade de contato com a água, uma vez que os reagentes usados na síntese são higroscópicos e/ou reativos e, portanto, seu contato com a água diminui o rendimento da reação.

Foi realizada uma análise de custo da produção de BAA feita na planta piloto, conforme apresentada na [Tabela 11](#). Além da remoção da operação em Soxhlet, validada em etapa anterior do trabalho, a recuperação dos produtos químicos foi realizada. O etanol utilizado no pré-tratamento foi 95 % recuperado e utilizado na etapa de lavagem do BAA. O volume de etanol utilizado na etapa de lavagem foi reduzido em 20 % na produção em maior escala.

Os volumes de DMF e do éter etílico utilizados na etapa de lavagem do BAA foram reduzidos em 50 % e 60 %, respectivamente, com o aumento de escala. O etanol e a DMF foram 80 % recuperados na etapa de lavagem, ao passo que o éter etílico teve uma recuperação de 90 %. Considerando a redução do volume dos produtos químicos utilizados na operação de lavagem e a recuperação dos solventes, o custo de 1,0 g de BAA reduziu de R\$ 7,90 para R\$ 6,99, o que representa uma redução de 11,5 %, quando comparado com o custo previsto para o processo otimizado, apresentado na [seção 5.3.4](#).

O bioadsorvente deve ser armazenado (A-201) em local seco ao abrigo da luz e sob temperatura ambiente. Ele não tende a ter ação de microrganismos se bem armazenado. O material forma uma suspensão se colocado em contato com a água, tendendo a decantar com o passar do tempo.

**Tabela 11** – Análise de custo do bioadsorvente produzido na planta piloto

<b>Atividade 1 - Pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar</b>									
<b>Produto Químico</b>	<b>Fornecedor</b>	<b>Marca</b>	<b>Quantidade de bagaço / g</b>	<b>Volume por grama / mL</b>	<b>Volume total / mL</b>	<b>Preço por litro</b>	<b>Custo total</b>		
Etanol (95%)	ICELTEC	EMFAL	40	50,0	2000	R\$ 12,79	R\$	1,28	
<b>Custo da atividade 1 para produção de 50 g de BAA</b>							<b>R\$</b>	<b>1,28</b>	
<b>Atividade 2 - Síntese do BAA (modificação química + lavagem)</b>									
<b>Produto Químico</b>	<b>Fornecedor</b>	<b>Marca</b>	<b>Quantidade de bagaço / g</b>	<b>Volume por grama / mL</b>	<b>Volume total / mL</b>	<b>Preço por litro</b>	<b>Custo total</b>		
Dimetilformamida (síntese)	Loja do laboratório	ACS	40	20,0	800	R\$ 45,00	R\$	36,00	
Epicloridrina	Sigma-Aldrich	Sigma-Aldrich	40	12,8	512	R\$ 360,00	R\$	184,32	
Trietilamina	LSC	CRQ	40	22,0	880	R\$ 98,00	R\$	86,24	
Dimetilformamida (lavagem)	Loja do laboratório	ACS	50	25,0	1250	R\$ 98,00	R\$	24,50	
Ácido clorídrico (0,1mol/L)	Quimidrol	Quimidrol	50	40,0	24,4	R\$ 9,48	R\$	0,23	
Etanol (95%)	ICELTEC	EMFAL	50	80,0	4000	R\$ 12,79	R\$	7,67	
Éter etílico	LSC	CRQ	50	20,0	1000	R\$ 95,00	R\$	9,50	
<b>Custo da atividade 2 para produção de 50 g de BAA</b>							<b>R\$</b>	<b>348,47</b>	
<b>Custo total de 1 kg do BAA (atv. 1 + atv. 2)</b>							<b>R\$</b>	<b>6.994,89</b>	
<b>Custo total de 50 g do BAA (atv. 1 + atv. 2)</b>							<b>R\$</b>	<b>349,74</b>	
<b>Custo total de 1 g do BAA (atv. 1 + atv. 2)</b>							<b>R\$</b>	<b>6,99</b>	

Fonte: Autoria própria (2022).

### 5.3.9. Potencial de geração de subprodutos a partir do efluente

O efluente obtido após a modificação química é um líquido heterogêneo, que apresenta uma fase viscosa alaranjada e uma fase amarelada suspensa, conforme apresentado na [Figura 26](#). O efluente gerado pelas atividades produtivas deve ser descartado conforme Resolução CONAMA N° 430 de 2011, que dispõe sobre os padrões de lançamento de efluentes.

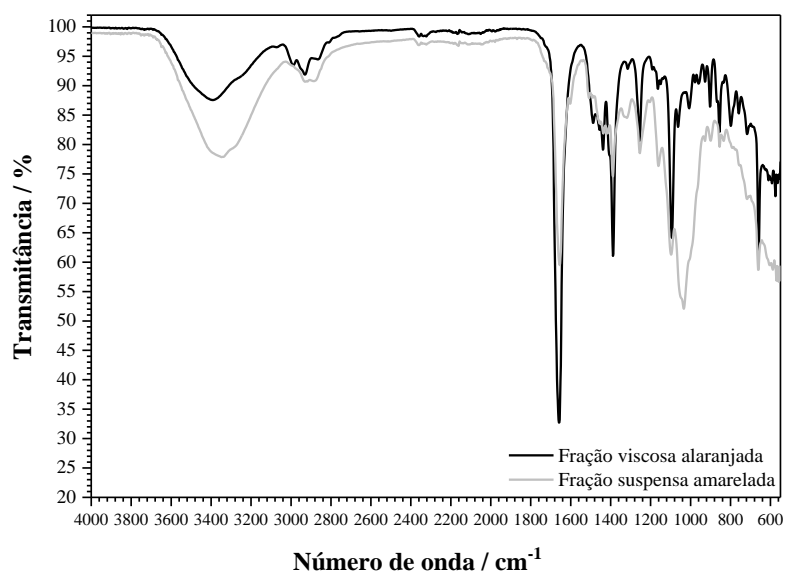
**Figura 26** – Fases do efluente gerado após a etapa de modificação química



**Fonte:** Autoria própria (2022).

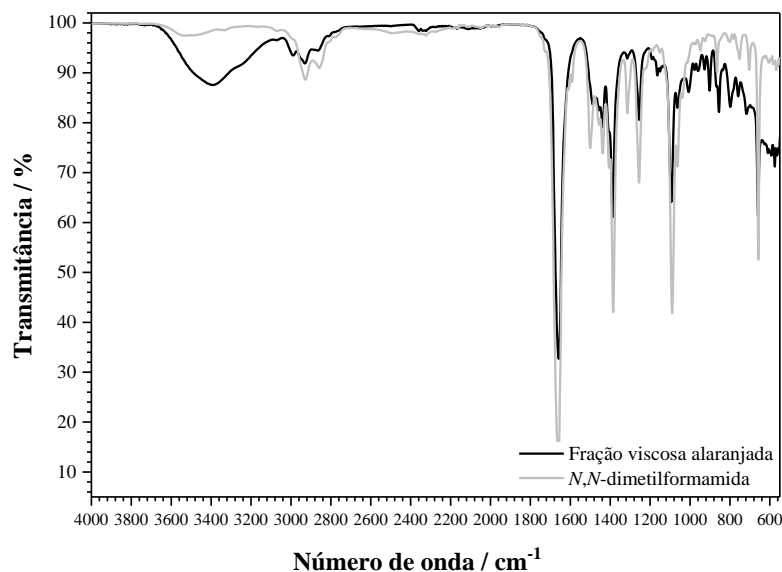
Visando otimizar a viabilidade econômica e ambiental do processo, bem como reduzir a necessidade de descarte de produtos químicos, buscaram-se alternativas para a transformação do efluente em subprodutos de valor agregado. Os espectros de FTIR das fases alaranjada e amarela foram apresentados na [Figura 27](#) e comparados com o espectro da DMF, conforme apresentados nas [Figura 28](#) e [Figura 29](#), respectivamente.

**Figura 27** – Espectro no infravermelho (FTIR) da fração viscosa alaranjada e da fração amarelada



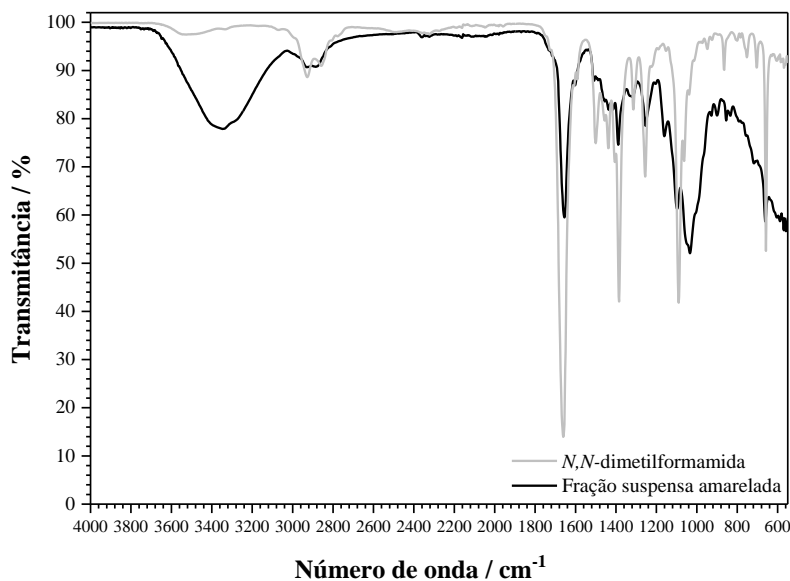
**Fonte:** Autoria própria (2022).

**Figura 28** – Espectro no infravermelho (FTIR) da fração viscosa alaranjada e da *N,N*-dimetilformamida



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 29** – Espectro no infravermelho (FTIR) da fração amarelada e da *N,N*-dimetilformamida



Fonte: Autoria própria (2022).

A análise dos espectros, em conjunto com as informações reportadas pela literatura, permitiu a identificação das bandas de cada uma das fases do efluente, conforme apresentado na [Tabela 12](#). A banda observada entre 1655 e 1660  $\text{cm}^{-1}$  é associada ao estiramento da ligação C-O (carbonila de amida) da DMF, presente em todos os espectros. A banda em 928 e 2990  $\text{cm}^{-1}$ , observada no espectro da fração alaranjada, é atribuída às vibrações de estiramento da ligação C-N em  $\text{N}^+(\text{CH}_2\text{CH}_3)_3$ . Já no espectro da fração amarelada, as bandas entre 1300 e 1000  $\text{cm}^{-1}$  podem ser associadas às hemiceluloses solubilizadas (ligação C-O de éter, no caso ligação  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) em xilanas) ([PAIVA et al., 2010](#)).

**Tabela 12** – Descrição das bandas dos espectros de FTIR do efluente

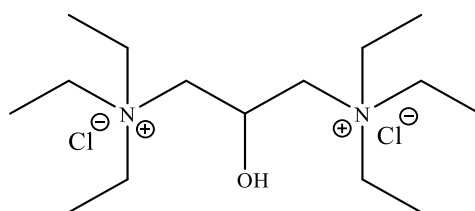
N° de onda / $\text{cm}^{-1}$	Grupamento químico	N° de onda / $\text{cm}^{-1}$			Referências
		DMF	Fração alaranjada	Fração amarelada	
657	Deformação N-C-O mais estiramento C-N e C-N-C (tesoura), deformação N-C-O (fora do plano), C-N-C (rotação) (no plano), CH <sub>3</sub> (torcional), C-N-C (torção) mais CH <sub>3</sub> (torcional)	657	658	-	SHASTRI <i>et al.</i> , 2017
865	Estiramento simétrico C-N	865	-	-	
930	Estiramento N <sup>+</sup> -(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	-	928	-	ANASTASSOPOULOU, 1991; KIM; HIRAO; IKEDA, 1996
1036	Estiramento C-O/C-C e deformação C-O(H) de xilanas de hemiceluloses	-	-	1034	R'ASPOLLI GALLETTI <i>et al.</i> , 2015
1053	C-O em C-3 xilopiranosose	-	-	1053	
1090	Vibração da ligação CH <sub>3</sub>	1090	1094	-	SHASTRI <i>et al.</i> , 2017
1160	Estiramento C-O/C-N	-	-	1161	RASPOLLI GALLETTI <i>et al.</i> , 2015; ANASTASSOPOULOU, 1991; KIM; HIRAO; IKEDA, 1996
1256	Estiramento assimétrico C-N	1256	1256	-	SHASTRI <i>et al.</i> , 2017; ANASTASSOPOULOU, 1991; KIM; HIRAO; IKEDA, 1996
1385	Deformação N-CH (no plano) e deformação CH <sub>3</sub>	1385	1389	1389	SHASTRI <i>et al.</i> , 2017
1438	Deformação CH <sub>3</sub> (no plano)	1438	-	-	RASPOLLI GALLETTI <i>et al.</i> , 2015; ANASTASSOPOULOU, 1991; KIM; HIRAO; IKEDA, 1996
1500	Estiramento C-N e deformação simétrica CH <sub>3</sub>	1500	-	-	SHASTRI <i>et al.</i> , 2017
1660	Estiramento C-O (carbonila de amida)	1660	1659	1655	
2856	Estiramento assimétrico CH <sub>3</sub> (trans)	2856	-	-	SHASTRI <i>et al.</i> , 2017
2930	Estiramento assimétrico CH <sub>3</sub> (cis)	2930	-	-	
3000	Estiramento N <sup>+</sup> -(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	-	2990	-	ANASTASSOPOULOU, 1991; KIM; HIRAO; IKEDA, 1996
3074	Estiramento assimétrico CH <sub>3</sub> (trans)	3074	-	-	SHASTRI <i>et al.</i> , 2017
3350	Estiramento assimétrico N-H	-	3396	3346	RASPOLLI GALLETTI <i>et al.</i> , 2015

Fonte: Autoria própria (2022).

A DMF deve ser separada do efluente gerado pela etapa de modificação química e recuperada por destilação. Já a mistura de epicloridrina e trietilamina, suspensão alaranjada da Figura 26, parece ter formado o surfactante gemini, conforme estrutura da Figura 30, que pode ser comercializado com a indústria química (LI; CHEN, 2011; NAINI., 2018; RICCI *et al.*, 2002). O surfactante gemini é caracterizado por possuir duas cadeiras hidrofóbicas ligadas a um grupo espaçador e possuem propriedades superiores aos surfactantes que tem apenas uma “cauda”, levando a uma maior eficiência na aplicação

devido a concentração micelar crítica muito baixa, rica morfologia de agregação e elevada eficiência para redução da tensão superficial (LI *et al.*, 2015).

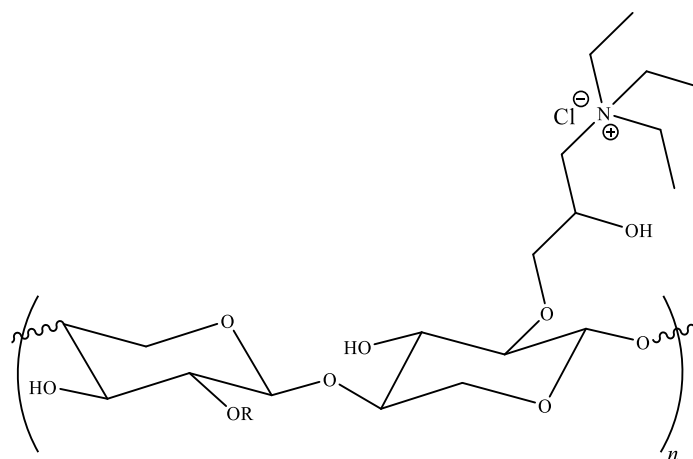
**Figura 30** – Proposta de estrutura para o surfactante gemini formado durante a modificação química do bagaço de cana com epícloridrina e trietilamina (provavelmente corresponde a fração viscosa alaranjada)



**Fonte:** Autoria própria (2022).

Outra possibilidade, verificada por Maia (2020), é a cationização das cadeias de xilana das hemiceluloses do bagaço de cana durante a modificação química com epícloridrina e trietilamina, produzindo, nesse caso, cadeias de xilana catiônicas, conforme mostrado na Figura 31. Essa hipótese foi comprovada por Maia (2020) a partir de espectro de ressonância magnética nuclear de carbono 13 (RMN de  $^{13}\text{C}$ ) em fase sólida, o qual mostrou que os sinais correspondentes aos carbonos das hemiceluloses praticamente desaparecem do espectro de RMN de  $^{13}\text{C}$  do BAA quando comparado ao espectro de RMN de  $^{13}\text{C}$  do bagaço de cana não modificado quimicamente.

**Figura 31** – Proposta de estrutura do surfactante a base de hemiceluloses (cadeias de xilana) formado durante a modificação química do bagaço de cana com epícloridrina e trietilamina (provavelmente corresponde a fração amarelada) (R = H ou unidade de epícloridrina ligada a trietilamina)



**Fonte:** Autoria própria (2022).

A utilização de surfactantes a base de hemiceluloses – uma matéria-prima renovável – é vantajosa para a indústria química, uma vez que eles geram menor impacto ambiental, apresentam baixa toxicidade e elevada biodegradabilidade (KJELLIN; JOHANSSON, 2010).

#### 5.4. Análise da viabilidade econômica e financeira

O estudo da viabilidade da planta piloto foi realizado para avaliar a performance econômico-financeira do modelo de negócio que visa a comercialização do MVP acoplável ao filtro de barro para remoção de arsênio da água. Após os ajustes, o MVP deve ser testado pelos potenciais clientes e ajustado com base na experiência dos usuários para a formação do produto que poderá ser comercializado.

Busca-se verificar a atratividade do retorno potencial, em cinco anos (médio prazo), do investimento necessário para o funcionamento de uma empresa com capacidade produtiva equivalente à planta piloto do GFQO, que tenha como finalidade a comercialização dos dispositivos adsorventes acopláveis ao filtro de barro para remoção de arsênio. As considerações iniciais para o estudo são apresentadas na [Tabela 13](#).

**Tabela 13** – Considerações para avaliação da viabilidade do modelo de negócio

Item	Unidade	Valor	Detalhamento
Quantidade máxima de bioadsorvente produzido por lote no reator	Gramas	250	Produção de BAA em reator com carga de trabalho de 70% do volume total (11,2 L).
Quantidade de lotes de bioadsorvente produzida por dia de trabalho	Lote	1	Carga horária de 8 horas de trabalho por dia e um turno de produção.
Quantidade de MVPs produzidos por dia de trabalho	MVP	250	MVP composto por dois dispositivos com 0,5 g de bioadsorvente cada.
Produção anual máxima	MVP	60.000	Considerando 140 dias de produção por ano.
Aumento gradativo da capacidade produtiva anual	%	20	Aumento anual de 20 % da produção máxima. Ano 1 - 20 %, Ano 2 - 40 %; Ano 3 - 60 %; Ano 4 - 80 %; Ano 5 - 100 %.
Mercado Total / <i>Total Available Market</i> (TAM)	Pessoas	200 milhões	Número de pessoas no mundo que consomem água contaminada com arsênio fora do padrão de potabilidade determinado pela OMS ( <a href="#">BUNDSCHUH et al., 2022</a> ).
Mercado Alcançável / <i>Serviceable Available Market</i> (SAM)	Pessoas	14 milhões	Número de pessoas na América Latina que consomem água contaminada com arsênio fora do padrão de potabilidade determinado pela OMS ( <a href="#">KUMAR et al., 2019</a> ).
Mercado Acessível / <i>Serviceable Obtainable Market</i> (SOM)	Pessoas	552.600	Número de pessoas acessíveis após cinco anos de produção com aumento gradativo anual.
Quantidade média de pessoas por família para definição do mercado	Pessoas	3,07	Série “Fatos e Números” da <a href="#">Secretaria Nacional da Família (2021)</a> .

**Fonte:** Autoria própria (2022).

##### 5.4.1. Componentes do MVP

O custo unitário do MVP foi definido com base no preço de venda dos componentes praticado pelo varejo, conforme apresentado na [Tabela 14](#). Considerou-se o conjunto de dispositivos (D1 e D2), descritos na [seção 5.2.4](#), para o levantamento da quantidade de cada material necessário para a montagem do MVP. O valor utilizado para



a produção de 1,0 g do bioadsorvente foi determinado pela produção realizada no reator de aço inox, conforme apresentado na [seção 5.3.8](#).

**Tabela 14** – Custo dos componentes para montagem do MVP

<b>Componentes</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor unitário / R\$</b>	<b>Custo total / R\$</b>
Bioadsorvente	1,00	Gramas	6,99	6,99
Tubo PVC	0,15	Metro	3,00	0,45
Tampa para tubo PVC	2	Unitário	2,00	4,00
Esferas de Vidro	8	Gramas	0,10	0,80
Manta de fibra de vidro	2	Gramas	0,08	0,16
Cola para PVC	2	Gramas	0,41	0,82
<b>Total</b>				<b>13,22</b>

**Fonte:** Autoria própria (2022).

#### 5.4.2. Bens de capital

O investimento em bens de capital (*Capital Expenditure*, CAPEX) foi determinado para a configuração de uma planta piloto com equipamentos similares aos industriais. Espera-se determinar os desafios do processo produtivo para contribuir com a produção em escala industrial. O valor de cada equipamento da planta piloto e a etapa de produção correspondentes são apresentados na [Tabela 15](#).

**Tabela 15** – Investimento em bens de capital para montagem da planta piloto

<b>Etapa de Produção</b>	<b>Equipamentos</b>	<b>Investimento / R\$</b>
	Moinho de facas do tipo Willey	15.000,00
Seleção granulométrica	Agitador eletromagnético	14.000,00
	Peneiras	1.600,00
Modificação química	Reator	51.400,00
	Acessórios	1.000,00
Lavagem e secagem	Bomba de vácuo	1.700,00
	Estufa a vácuo	23.000,00
Montagem do MVP	Furadeira	300,00
Todas as etapas	Instalações	2.000,00
<b>Investimento total em bens de capital</b>		<b>110.000,00</b>

**Fonte:** Autoria própria (2022).

Os ativos imobilizados necessários para a produção da tecnologia estão sujeitos à obsolescência natural ou desgaste pelo uso. Dessa forma, deve-se considerar a depreciação na operação contábil da empresa. A Instrução Normativa da Receita Federal,

Nº 1.700 de 2017 (BRASIL, 2017), dispõe acerca do prazo de vida útil e da taxa anual de depreciação de cada tipo de ativo.

O impacto da despesa com depreciação não é visualizado no fluxo de caixa, uma vez que não é realizada uma saída financeira do caixa da empresa relacionada à depreciação. No momento do investimento em um equipamento, por exemplo, a empresa realiza o lançamento da despesa com a compra do equipamento em contrapartida da entrada do ativo e, ao longo da vida útil do bem, o valor do ativo é reduzido até alcançar seu valor residual (CPC, 2009).

#### 5.4.3. Consumo energético

O custo mensal de energia elétrica consumida para produção do MVP foi definido com base na estimativa do tempo de uso mensal de cada equipamento, utilizando a potência nominal, conforme apresentado na Tabela 16. Considerou-se o valor de R\$ 0,63679 por kWh, correspondente à “bandeira amarela” da categoria “B3, Demais Classes” (CEMIG, 2022).

**Tabela 16** – Custo mensal de energia da planta piloto

Equipamentos	Tempo de uso mensal / h	Potência / W	Consumo mensal / R\$
Moinho de facas do tipo Willey	20	1500	30,00
Agitador eletromagnético	40	300	12,00
Estufa a vácuo	380	800	304,00
Bomba de vácuo	30	750	22,50
Reator	80	2200	176,00
Furadeira	60	450	27,00
<b>Total</b>			<b>571,50</b>

**Fonte:** Aatoria própria (2022).

#### 5.4.4. Mão de obra

A mão de obra necessária para o funcionamento da unidade de produção, bem como das atividades administrativas e comerciais foram consideradas para o cálculo do fluxo de caixa. Considerou-se um aumento gradativo da quantidade de colaboradores em cada área, de acordo com a previsão de aumento da produção ao longo de cinco anos, conforme apresentado na Tabela 17. Os salários foram multiplicados por um fator de 1,8 para considerar os encargos pagos pela empresa<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> O fator de correção foi obtido em reuniões com especialistas em investimento e é utilizado nos estudos iniciais de viabilidade financeira para os cálculos dos custos de mão de obra.

**Tabela 17** – Distribuição anual da mão de obra por função

Função	Salário (com encargos)	Ano				
		1	2	3	4	5
Operador de produção	2.181,60	1	1	2	2	2
Supervisor de produção	5.400,00	1	1	1	1	1
Operador de montagem	2.181,60	1	1	2	3	3
Analista de Vendas	6.300,00	1	1	2	2	3
Analista Administrativo	5.400,00	1	1	1	1	1

Fonte: Autoria própria (2022).

#### 5.4.5. Estrutura de custos

A estrutura de custo foi definida e os custos unitários foram descritos para a formação do fluxo de caixa, conforme apresentado na [Tabela 18](#). Os itens foram classificados em grupos para possibilitar a identificação no fluxo de caixa.

**Tabela 18** – Valor unitário dos itens da estrutura de custos do modelo de negócio

Item	Unidade	Valor Unitário / R\$	Grupo no Fluxo de Caixa
Componentes do MVP	MVP	13,22	Componentes
Operador de produção	Salário (com encargos)	2.181,60	Mão de Obra Direta
Supervisor de produção	Salário (com encargos)	5.400,00	
Operador de montagem	Salário (com encargos)	2.181,60	
Energia elétrica da produção	kWh	0,64	Custo Indireto
Aluguel de imóvel - Produção	Aluguel	2.000,00	
Analista de vendas	Salário (com encargos)	6.300,00	Custo Comercial
Marketing	Mensalidade	500,00	
Analista Administrativo	Salário (com encargos)	5.400,00	Custo Administrativo
Energia Elétrica - Sede	kwh	0,64	
Água	Mensalidade	250,00	
Internet	Mensalidade	200,00	
Aluguel Imóvel - Sede	Aluguel	1.200,00	
Jurídico	Mensalidade	500,00	
Contabilidade	Mensalidade	2.000,00	
Seguro	Mensalidade	500,00	

Fonte: Autoria própria (2022).

#### 5.4.6. Tributação e custos variáveis

O regime tributário utilizado para o cálculo do fluxo de caixa foi o Simples Nacional, que engloba os seguintes tributos: Imposto Sobre Serviços (ISS), Programa de

Integração Social e Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público (PIS/PASEP), Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (CONFINS), Imposto sobre a Renda da Pessoa Jurídica (IRPJ), Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL), Contribuição Patronal Previdenciária (CPP) e Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) (BRASIL, 2006).

A alíquota utilizada para o cálculo do tributo varia de acordo com a receita bruta da empresa e o setor de atuação. Foram utilizados os valores presentes no Anexo II da Lei Complementar Nº 123 de 2006, que representam o setor industrial. A alíquota efetiva é definida com base na receita bruta, utilizando o fator de correção correspondente para cada faixa de receita (BRASIL, 2006). A alíquota efetiva do Simples Nacional para cada ano de operação da planta piloto, considerando o aumento gradativo de produção, os *royalties* pagos pelo desenvolvimento da tecnologia e o percentual definido para a comissão das vendas são apresentados na Tabela 19.

**Tabela 19** – Custos variáveis do modelo de negócio

Item	Valor / %	Base de Cálculo	Custo por dispositivo / R\$
Imposto - Ano 1	6,75		2,40
Imposto - Ano 2	8,56		3,05
Imposto - Ano 3	9,44	Receita bruta	3,36
Imposto - Ano 4	9,88		3,52
Imposto - Ano 5	10,69		3,80
<i>Royalties</i>	3,0	Receita bruta	1,07
Comissão	1,0	Preço de venda	0,36

**Fonte:** Autoria própria (2022).

De acordo com o SEBRAE (2020), apesar da simplificação do Simples Nacional ocasionada pelo recolhimento de uma única guia de tributo, existem outros regimes tributários que devem ser analisados para a definição da melhor opção para cada empresa. A tributação pelo Lucro Real pode ser uma opção para *startups* que possuem um plano de crescimento que não geram lucros no início dos anos de atuação. Já a tributação pelo Lucro Presumido também pode ser uma opção para prestadores de serviço ou empresas com lucro superior a 32 % do faturamento bruto.

#### 5.4.7. Precificação

Definiu-se o custo unitário do MVP pelo somatório dos custos unitários de cada item da estrutura de custo, considerando a produção máxima da planta piloto de 60.000 unidades. O preço de venda dos dispositivos foi calculado pela multiplicação do custo unitário do MVP pelo *markup*, conforme apresentado na [Tabela 20](#).

**Tabela 20** – Precificação pelo índice multiplicador (*markup*)

<b>Custos por grupo</b>	<b>Custo Anual / R\$</b>	<b>Valor equivalente por unidade / R\$</b>
Componentes	793.411,76	13,22
Mão de Obra Direta (MOD)	195.696,00	3,26
Custo Indireto	28.367,11	0,47
Custo Comercial	254.142,00	4,24
Custo Administrativo	122.128,30	2,04
<b>Custo Total Unitário</b>		<b>23,23</b>
<b>Itens variáveis</b>	<b>Percentual por unidade / %</b>	
<i>Royalties</i>	3,00	
Impostos	10,69	
Comissões sobre Vendas	1,00	
Lucro Pretendido	20,00	
<b>Percentual total / %</b>	<b>34,69</b>	
<b>Índice multiplicador (<i>markup</i>)</b>	<b>1,53125<sup>(a)</sup></b>	
<b>Preço de Venda / R\$</b>	<b>35,57</b>	

<sup>(a)</sup> O Índice multiplicador (*markup*) foi obtido a partir da [Equação \(4\)](#).

**Fonte:** Autoria própria (2022).

#### 5.4.8. Fluxo de caixa

Com a definição das condições de operação da empresa, da estrutura de custo da produção na planta piloto e do preço de cada MVP foi possível montar o fluxo de caixa previsto para cinco anos, conforme apresentado na [Tabela 21](#).

**Tabela 21** – Fluxo de caixa esperado para o modelo de negócio

<b>Descrição</b>	<b>Ano 1</b>	<b>Ano 2</b>	<b>Ano 3</b>	<b>Ano 4</b>	<b>Ano 5</b>
Unidades Vendidas	12.000	24.000	36.000	48.000	60.000
Receita Bruta / R\$	426.834,05	853.668,10	1.280.502,15	1.707.336,19	2.134.170,24
Simplex Nacional / R\$	-28.823,40	-73.110,83	-120.916,24	-168.721,65	-228.223,03
Royalties / R\$	-12.805,20	-25.610,40	-38.415,60	-51.220,80	-64.026,00
Receita Líquida / R\$	385.205,44	754.946,87	1.121.170,31	1.487.393,74	1.841.921,22
Componentes / R\$	-158.682,35	-317.364,71	-476.047,06	-634.729,41	-793.411,76
Mão de Obra Direta (MOD) / R\$	-117.158,40	-117.158,40	-169.516,80	-195.696,00	-195.696,00
Custo do Produto Vendido (CPV) / R\$	-275.840,75	-434.523,11	-645.563,86	-830.425,41	-989.107,76
Lucro Bruto / R\$	109.364,69	320.423,76	475.606,45	656.968,33	852.813,45
Custos Indiretos / R\$	-28.367,11	-28.367,11	-28.367,11	-28.367,11	-28.367,11
Despesas Comerciais / R\$	-85.868,40	-90.136,80	-170.005,20	-174.273,60	-254.142,00
Despesas Administrativa / R\$	-122.128,30	-122.128,30	-122.128,30	-122.128,30	-122.128,30
Total Custos e Despesas / R\$	-512.204,55	-675.155,31	-966.064,46	-1.155.194,41	-1.393.745,17
Lucro/Prejuízo Líquido / R\$	-126.999,11	79.791,56	155.105,84	332.199,33	448.176,05
Lucro/Prejuízo Acumulado / R\$	-236.999,11	-157.207,55	-2.101,70	330.097,62	778.273,67
Índice de Lucratividade / %	-29,75%	9,35%	12,11%	19,46%	21,00%

**Fonte:** Autoria própria (2022).

#### 5.4.9. Indicadores financeiros

A produção esperada ao longo dos cinco anos de operação pode alcançar 4 % do mercado acessível, o que representa um total de 180.000 famílias. Os indicadores financeiros foram calculados com base no fluxo de caixa para avaliação da viabilidade econômico-financeira do modelo de negócio, conforme apresentado na [Tabela 22](#). Além do cenário esperado, foram definidos os cenários otimista e pessimista, com 10 % a mais e a menos do número de unidades vendidas, respectivamente.

**Tabela 22** – Indicadores financeiros do modelo de negócio

Indicador Financeiro	Cenário		
	Otimista	Esperado	Pessimista
Taxa Mínima de Atratividade (TMA) / %	20	20	20
Valor Presente Líquido (VPL) / R\$	444.224,53	269.654,59	129.654,28
Taxa Interna de Retorno (TIR) / %	56	28	6
<i>Payback</i> / ano	2,38	3,01	3,41
<i>Payback</i> Descontado / ano	2,82	3,44	4,10
Ponto de Equilíbrio ( <i>breakeven point</i> ) / ano	1,44	1,61	1,76
Investimento em bens de capital (CAPEX) / R\$	110.000,00	110.000,00	110.000,00
Investimento Total / R\$	320.159,64	346.999,11	361.838,58

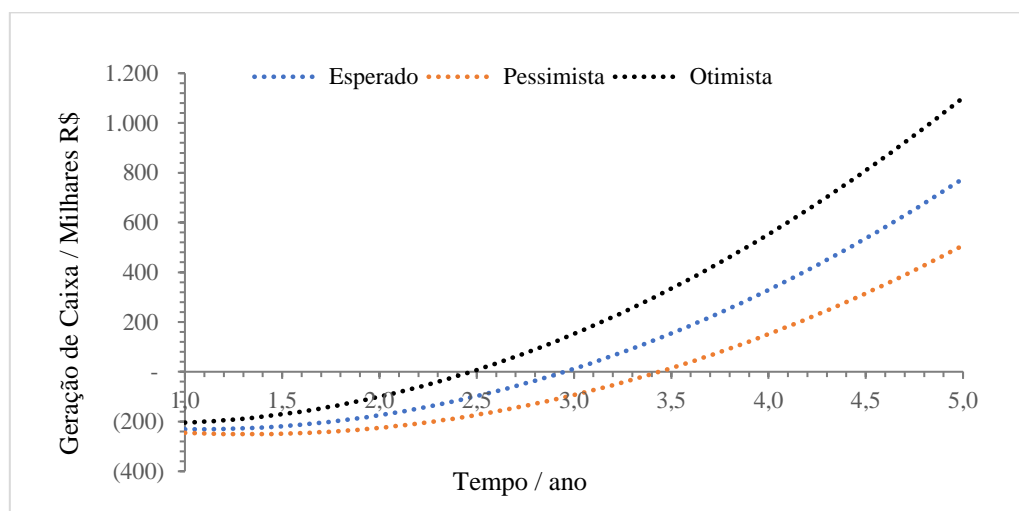
**Fonte:** Autoria própria (2022).

A TMA é a taxa de rendimento definida por cada investidor que indica o retorno mínimo aceitável na realização de um investimento ([REIS, 2019](#)). A determinação da TMA é realizada pela relação entre retorno e risco, ou seja, o investimento em um desenvolvimento tecnológico deve apresentar um retorno significativamente superior ao investimento em produtos financeiros de baixo risco, como é o caso da Renda Fixa. Definiu-se uma TMA de 20 % para avaliar a atratividade do investimento.

O VPL é o valor no momento presente equivalente ao resultado futuro, utilizado para eliminar a variação do custo do capital ao longo do tempo ([PUCCINI, 2017](#)). Apesar dos valores positivos da VPL em todos os cenários, é necessário comparar a TIR com a TMA para identificar a atratividade do investimento para que a análise fique mais robusta. A TIR é a taxa de juros que faz com que o VPL de um fluxo de caixa seja igual a zero ([PUCCINI, 2017](#)). Quando a TIR é superior à TMA, significa que o rendimento obtido pelo investimento pode ser aceitável pelo investidor ([REIS, 2018](#)). Os cenários “esperado” e “otimista” apresentaram TIR superiores à TMA, indicando uma expectativa de retorno satisfatória para os investidores.

O *payback* é calculado a partir da [Equação \(7\)](#) e indica o momento em que o investimento total será recuperado através da geração de caixa de uma empresa, sem considerar o custo do capital ao longo do tempo (XP, 2022). O gráfico apresentado na [Figura 32](#) representa a geração de caixa acumulada ao longo dos cinco anos para o modelo de negócio proposto e possibilita identificar o *payback* para cada cenário.

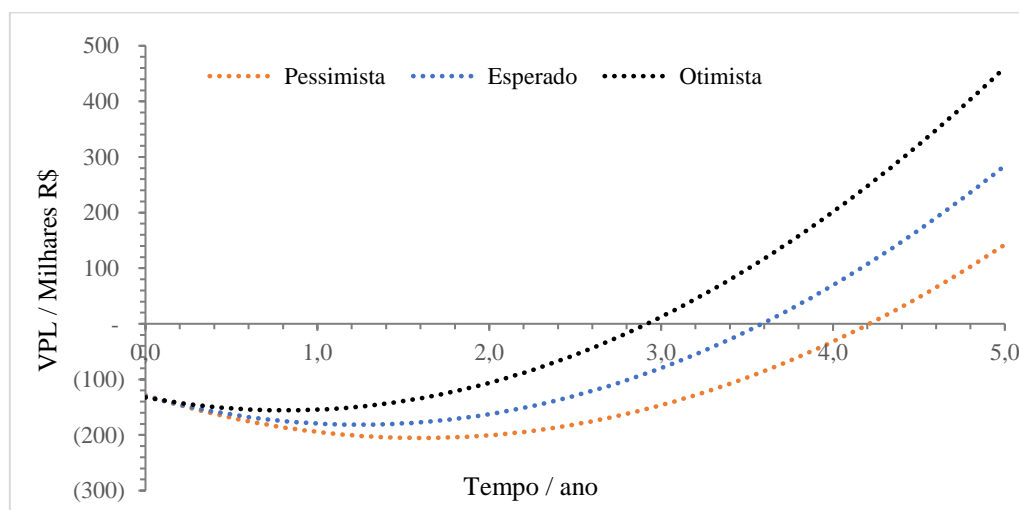
**Figura 32** – Gráfico da geração de caixa do modelo de negócio



**Fonte:** Autoria própria (2022).

O *payback* descontado é calculado a partir da [Equação \(8\)](#) e indica o momento em que o investimento total será recuperado através da geração de caixa de uma empresa, considerando o custo do capital ao longo do tempo (XP, 2022). O gráfico representado na [Figura 33](#) representa a geração de caixa acumulada e descontada ao longo dos cinco anos para o modelo de negócio proposto e possibilita identificar o *payback* descontado para cada cenário.

**Figura 33** – Gráfico do Valor Presente líquido (VPL) do modelo de negócio

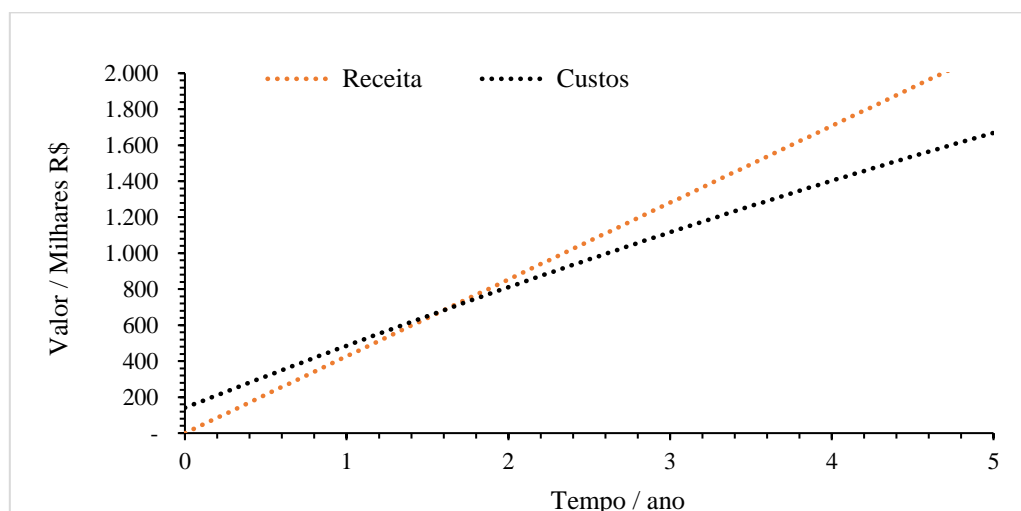


**Fonte:** Autoria própria (2022).



O ponto de equilíbrio, também conhecido como *breakeven point*, representa o momento em que a empresa deixa de gerar prejuízo e passa a reportar lucro no fluxo de caixa (AFONSO, 2021), conforme apresentado na Figura 34. O ponto de equilíbrio, calculado conforme a Equação (9), foi alcançado com um ano e oito meses de operação, considerando o cenário esperado.

**Figura 34** – Gráfico da evolução das receitas e custos do modelo de negócio



**Fonte:** Autoria própria (2022).

Os indicadores (Tabela 22) mostram que o modelo de negócio proposto possui elevado potencial de tornar-se bem-sucedido do ponto de vista econômico e financeiro, após a realização dos testes com o MVP. Nota-se a importância da integração entre os aspectos técnicos e de mercado para o desenvolvimento de tecnologias competitivas.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou alguns dos gargalos de se trabalhar com biomassa lignocelulósica para descontaminação de águas, abordando aspectos importantes do ponto de vista técnico e econômico e servindo como uma espécie de guia para grupos de pesquisa que tenham interesse em trabalhar com biomateriais para fins de descontaminação de água e desenvolver produtos a partir desses materiais.

Conforme discutido anteriormente, um gargalo identificado nesse contexto é a existência de diversos bioadsorventes, sejam eles a base de bagaço de cana, celulose, quitosana, madeira, etc., que não chegam a ser comercializados no mercado. Apesar das patentes e artigos científicos reportarem o surgimento desses novos materiais, não existem bioadsorventes a base dos materiais acima citados sendo produzidos em escala comercial no presente momento.

Apesar da comprovação do potencial dos bioadsorventes em escala de bancada, a ausência dos bioadsorventes no mercado, sinaliza a necessidade de estudos como este para avaliar a viabilidade técnica e econômica de escalonar tais tecnologias. Dessa forma, este trabalho pode guiar grupos de pesquisa desde o início da concepção dos materiais a adotarem estratégias de modificação química mais verdes, técnica e economicamente viáveis, para que possamos em um futuro breve contar com bioadsorventes comerciais para o tratamento de águas e efluentes, fomentando a bioeconomia circular.

Nesse sentido, as tecnologias desenvolvidas pelo GFQO, a partir da modificação química do bagaço de cana-de-açúcar, possuem elevado potencial para se transformarem em inovação no mercado de tratamento de água de abastecimento e efluentes industriais. No entanto, o desenvolvimento de sistemas específicos para cada um dos problemas encontrados mostra-se necessário, uma vez que as particularidades das fontes de água natural ou dos efluentes podem interferir de formas diferentes na eficiência de remoção de um contaminante específico. Dessa forma, busca-se o desenvolvimento de produtos cada vez mais direcionados às demandas encontradas no mercado.

Foram identificadas duas demandas específicas para o bioadsorvente de ânions, quais sejam: *i*) tratamento de efluente contaminado por arsênio gerado por mineradoras de ouro; *ii*) tratamento de água subterrânea contaminada por arsênio utilizada como fonte alternativa de abastecimento pela população de Ouro Preto, Minas Gerais. Os testes realizados com amostras contaminadas em laboratório comprovaram a capacidade de adsorção de arsênio na ausência dos ânions interferentes.

Com relação aos estudos realizados com amostras de água natural, os testes em batelada apresentaram elevada capacidade de remoção de arsênio e uma cinética de adsorção favorável para a aplicação do material em modo contínuo. O BAA alcançou uma capacidade de remoção ligeiramente inferior à alumina ativada comercializada nos EUA e, portanto, é capaz de concorrer no mercado, tendo como diferencial a produção de base renovável. Além disso, o BAA apresentou uma capacidade de recuperação superior a 95 %, o que pode reduzir consideravelmente os custos de aplicação da tecnologia pela indústria.

O teste realizado com o dispositivo contendo o bioadsorvente acoplável ao filtro de barro mostrou a necessidade de uma solução em série para a remoção dos ânions presentes na água subterrânea, antes da remoção de arsênio. Dessa forma, a validação da tecnologia em um ambiente relevante contribuiu para o alcance da TRL 4. A continuidade do projeto será necessária para otimização da configuração do sistema para aplicação nas residências de Ouro Preto, MG.

O bioadsorvente obteve o certificado de inocuidade, conferido pela adequação ao padrão NSF/ANSI 61 de 2016: *Drinking Water System Components - Health Effects* do Instituto de Normas Nacionais Americanas, na categoria de meios de processos de filtração (NSF, 2016).

O mapeamento e otimização do processo produtivo do bioadsorvente indicaram que não houve a lixiviação de extrativos pela aplicação do material produzido sem a etapa de extração em Soxhlet, o que gerou uma redução do número de operações unitárias empregadas no pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar e da quantidade de solventes utilizados nessa etapa. Os produtos químicos necessários para a modificação química do bagaço de cana-de-açúcar não são produzidos no Brasil, o que mostra a relevância do “Movimento Química Pós 2022” na busca pela soberania do país para a produção da indústria química nacional. Apesar da necessidade de importação dos produtos químicos, as rotas de obtenção dos reagentes vêm se tornando mais sustentáveis.

O material cuja modificação química foi realizada em maior escala (em reator de aço inox 304), partindo de 40,91 g de bagaço de cana-de-açúcar, alcançou um ganho de massa de 20,47 % e capacidade de adsorção de 18,91 mg g<sup>-1</sup>, o que possibilitou comprovar, junto com o espectro no infravermelho, que a modificação química foi bem-sucedida. Apesar disso, a operação no reator ainda carece de ajustes para que os parâmetros de qualidade e o desempenho máximo do bioadsorvente sejam atingidos.

A produção em planta piloto evidenciou os desafios do aumento de escala relacionados à manipulação das quantidades superiores de produtos químicos e do efluente gerado após a modificação química. A diferença de geometria e do material de fabricação do reator, o tipo de aquecimento e de agitação (mecânica) fazem com que sejam necessários ajustes na operação para o alcance da performance do processo em escala de bancada.

Dessa forma, além do conhecimento explícito neste trabalho, o GFQO passa a ser detentor de um conhecimento tácito que será fundamental para a transferência da tecnologia para a indústria, uma vez que a planta piloto possui características similares aos processos industriais. Além disso, o efluente gerado pelo processo produtivo apresentou potencial de ser recuperado e comercializado como surfactantes de elevado valor agregado, o que trouxe um ganho financeiro e ambiental para o bioadsorvente, tornando-o mais atrativo para a indústria.

Por fim, o modelo de negócio proposto para a comercialização dos dispositivos adsorventes tem o potencial de alcançar um total de 180.000 famílias ao longo de cinco anos, o que representa 4 % do número de pessoas que consomem água contaminada com arsênio na América Latina. Do ponto de vista de negócio, o fluxo de caixa apresentou um retorno para o investimento acima de 20 % ao ano, o que mostra o potencial do modelo de negócio ser mais atrativo que demais investimentos disponíveis no mercado.

## 7. PERSPECTIVAS FUTURAS

As considerações a seguir podem servir de base para o prosseguimento do desenvolvimento tecnológico do bioadsorvente de ânions empregado neste trabalho.

- a) Otimizar os dispositivos adsorventes acopláveis ao filtro de barro, considerando a vida útil para definição do MVP (TRL 5);
- b) Selecionar famílias em Ouro Preto para testes com os dispositivos e validação do MVP (TRL 6);
- c) Identificar novas configurações de produto para aplicação do bioadsorvente no tratamento residencial de água para consumo, tais como, filtros integrados com torneiras de cozinha, purificadores de água, entre outros;
- d) Validar em laboratório a integração da etapa de remoção de sulfato do efluente da mineração de ouro para validação da remoção de arsênio pelo bioadsorvente em modo contínuo (TRL 5), definindo a vida útil do sistema;
- e) Realizar estudos de dessorção com o bioadsorvente saturado após os testes com o efluente industrial;
- f) Otimizar o processo produtivo do bioadsorvente no reator de aço, visando o alcance dos parâmetros de qualidade e de desempenho obtidos no desenvolvimento em escala reduzida;
- g) Otimizar o balanço de massa e de energia do processo realizado na planta piloto para identificar a possibilidade de reciclo dos reagentes não consumidos;
- h) Identificar as indústrias interessadas na transferência da tecnologia para apresentação da viabilidade econômico-financeira, utilizando a escala industrial de produção e os valores dos reagentes comerciais vendidos a preço internacional em grandes quantidades;
- i) Aplicar as ferramentas de valoração de tecnologia para que, no caso de haver empresas interessadas na transferência de tecnologia, a negociação ocorra de forma justa para todas as partes envolvidas;
- j) Reavaliar a viabilidade econômico-financeira da planta piloto após a realização das modificações relacionadas ao produto e processo, visando o alinhamento da continuidade do desenvolvimento com a atratividade do investimento para o mercado.

## REFERÊNCIAS

- ABDOLALI, A.; GUO, W. S.; NGO, H. H.; CHEN, S. S.; NGUYEN, N. C.; TUNG, K. L. Typical lignocellulosic wastes and by-products for biosorption process in water and wastewater treatment: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 160, p. 57–66, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.037>>.
- ABIQUIM. **Produtos Químicos Brasileiros - BRAZILIAN CHEMICALS**. Disponível em: <<https://brachem.abiquim.org/BUSCA/?sl=S1&lg=1>>. Acesso em: 18 mar. 2021.
- ABNT. **Resíduos sólidos - classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. Disponível em: <<https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>>.
- ADARME, O. F. H. **Obtenção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia de resíduos do processo de produção de bioetanol de primeira e segunda geração**. 2020. 171 f. Tese, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/13224>>.
- AFONSO, J. **Breakeven: o que é e por que ele é tão importante para o seu negócio?** Disponível em: <<https://blog.nubank.com.br/breakeven-o-que-e-por-que-ele-e-tao-importante-para-o-seu-negocio/>>. Acesso em: 15 ago. 2022.
- AHMAD, A.; VAN DER WENS, P.; BAKEN, K.; DE WAAL, L.; BHATTACHARYA, P.; STUYFZAND, P. Arsenic reduction to <math><1\ \mu\text{g/L}</math> in Dutch drinking water. **Environment International**, v. 134, p. 105253, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105253>>.
- ALBERTINI, S.; DO CARMO, L. F.; DO PRADO FILHO, L. G. Use of sawdust and pulp from cane as adsorbents of cadmium. **Ciencia e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 1, p. 113–118, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0101-20612007000100020>>.
- ALIBABA. **Platform for global wholesale trade**. Disponível em: <<https://www.alibaba.com/?spm=a2700.8293689.scGlobalHomeHeader.10.110667afIpesB3>>. Acesso em: 9 mar. 2021.
- ALMEIDA, F. T. R. de; ELIAS, M. M. C.; XAVIER, A. L. P.; FERREIRA, G. M. D.; SILVA, I. A.; FILGUEIRAS, J. G.; AZEVEDO, E. R. de; SILVA, L. H. M. da; GIL, L. F.; GURGEL, L. V. A. Synthesis and application of sugarcane bagasse cellulose mixed esters. Part II: Removal of  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$  from single spiked aqueous solutions in batch and continuous mode. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 552, p. 337–350, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.05.046>>.
- ALMEIDA, F. T. R. de; FERREIRA, B. C. S.; MOREIRA, A. L. da S. L.; FREITAS, R. P. de; GIL, L. F.; GURGEL, L. V. A. Application of a new bifunctionalized chitosan derivative with zwitterionic characteristics for the adsorption of  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ , and oxyanions of  $\text{Cr}^{6+}$  from aqueous solutions: Kinetic and equilibrium aspects. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 466, p. 297–309, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.12.037>>.
- ANASTASSOPOULOU, J. D. Mass and FT-IR Spectra of Quaternary Ammonium Surfactants. **Chemistry and Properties of Biomolecular Systems**, p. 1–9, 1991. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-94-011-3620-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3620-4_1)>.
- ANDREOLI, C.; LINARDI, M. Convergência de Agricultura e Energia: I. Produção de Biomassa Celulósica para Biocombustíveis e Eletricidade. **Economia e**

**Energia**, n. 66, p. 1–13, 2008. Disponível em <<http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/5047/13157.pdf?sequence=1>>.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 115–128, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>>.

ASERE, T. G.; STEVENS, C. V.; DU LAING, G. Use of (modified) natural adsorbents for arsenic remediation: A review. **Science of the Total Environment**, v. 676, p. 706–720, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.237>>.

ATSDR. **Toxicological profile for arsenic u.s. department of health and human services**, 2007. Disponível em: <<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.pdf>>.

B3. **Índice Brasil ESG**. Disponível em: <[https://www.b3.com.br/pt\\_br/market-data-e-indices/indices/indices-em-parceria-s-p-dowjones/indice-brasil-esg.htm](https://www.b3.com.br/pt_br/market-data-e-indices/indices/indices-em-parceria-s-p-dowjones/indice-brasil-esg.htm)>. Acesso em: 30 jul. 2022.

BARRETO, E. da S. **Otimização das etapas de pré-tratamento alcalino do bagaço de cana de açúcar com 2-hidróxi-1,4-naftoquinona e hidrólise enzimática para a produção de etanol de segunda geração**. 2020. 132 f. Tese, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

BERG, M.; TRAN, H. C.; NGUYEN, T. C.; PHAM, H. V.; SCHERTENLEIB, R.; GIGER, W. Arsenic Contamination of Groundwater and Drinking Water in Vietnam: A Human Health Threat. **Environmental Science & Technology**, v. 35, n. 13, p. 2621–2626, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/es010027y>>.

BOER, H.; DURING, W. E. Innovation, what innovation? a comparison between product, process and organizational innovation. **International Journal of Technology Management**, v. 22, n. 1/2/3, p. 83–107, 2001. <Disponível em: <https://www.academia.edu/30825605>>.

BORBA, R. P.; FIGUEIREDO, B. R.; CAVALCANTI, J. A. Arsênio na água subterrânea em Ouro Preto e Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG). **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 57, n. 1, p. 45–51, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672004000100009>>.

BORBA, R. P.; FIGUEIREDO, B. R.; RAWLINS, B.; MATSCHULLAT, J. Geochemical distribution of arsenic in waters, sediments and weathered gold mineralized rocks from Iron Quadrangle, Brazil. **Environmental Geology**, v. 44, n. 1, p. 39–52, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00254-002-0733-6>>.

BRASIL. Senado Federal. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 1988.

BRASIL. Presidência da República, Casa Civil. **Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996**. Regula direitos e obrigações relativos à propriedade industrial. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 1996.

BRASIL. Presidência da República, Casa Civil. **Lei nº 10.357, de 27 de dezembro de 2001**. Estabelece normas de controle e fiscalização sobre produtos químicos que direta ou indiretamente possam ser destinados à elaboração ilícita de substâncias entorpecentes, psicotrópicas ou que determinem dependência física ou psíquica, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2001.

BRASIL. Presidência da República, Casa Civil. **Lei Complementar nº 123, de 14 de dezembro de 2006**. Institui o Estatuto Nacional da Microempresa e da Empresa de Pequeno Porte. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2006.

BRASIL. Presidência da República, Secretaria-Geral. **Lei nº 13.243, de 11 de janeiro de 2016**. Dispõe sobre estímulos ao desenvolvimento científico, à pesquisa, à capacitação científica e tecnológica e à inovação. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2016b.

BRASIL. Presidência da República, Secretaria-Geral. **Lei nº 13.267, de 6 de abril de 2016**. Disciplina a criação e a organização das associações denominadas empresas juniores, com funcionamento perante instituições de ensino superior. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2016b.

BRASIL. Presidência da República, Secretaria-Geral. **Decreto nº 9.283, de 7 de fevereiro de 2018**. Regulamenta o Novo marco legal de Inovação. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2018.

BUCHNER, G. A.; STEPPUTAT, K. J.; ZIMMERMANN, A. W.; SCHOMÄCKER, R. Specifying Technology Readiness Levels for the Chemical Industry. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 58, n. 17, p. 6957–6969, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05693>>.

BUNDSCHUH, J.; KHAN, N.; AYAZ, M.; BERG, M.; HERATH, I.; TOMASZEWSKA, B.; PRAKASH, J.; SIK, Y. Global arsenic dilemma and sustainability. **Journal of Hazardous Materials**, v. 436, p. 129-197, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129197>>.

BUNDSCHUH, J.; LITTER, M. I.; PARVEZ, F.; ROMÁN-ROSS, G.; NICOLLI, H. B.; JEAN, J.-S.; LIU, C.-W.; LÓPEZ, D.; ARMIENTA, M. A.; GUILHERME, L. R. G.; CUEVAS, A. G.; CORNEJO, L.; CUMBAL, L.; TOUJAGUEZ, R. One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. **Science of The Total Environment**, v. 429, p. 2–35, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>>.

CASTRO, B. S. de; SOUZA, G. C. de. O papel dos Núcleos de Inovação Tecnológica (NITs) nas universidades brasileiras | The role of Technological Innovation Centers in Brazilian universities. **Liinc em Revista**, v. 8, n. 1, 24, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.18617/liinc.v8i1.465>>.

CELTA BRASIL®. **Watercel SFM: Remoção de ferro, manganês e arsênio**. Disponível em: <<https://www.celtabrasil.com.br/portfolio/watercel-sfm/>>. Acesso em: 1 fev. 2022.

CEMIG. **Valores de tarifas e serviços**. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>>. Acesso em: 1 ago. 2022.

CETESB. VALORES ORIENTADORES PARA SOLO E ÁGUA SUBTERRÂNEA NO ESTADO DE SÃO PAULO. v. 2014, n. 1, p. 4–6, 2014. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/solo/wp-content/uploads/sites/18/2014/12/valores-orientadores-nov-2014.pdf>>.

CLANCY, T. M.; HAYES, K. F.; RASKIN, L. Arsenic waste management: A critical review of testing and disposal of arsenic-bearing solid wastes generated during arsenic removal from drinking water. **Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 19, p. 10799–10812, 2013. Disponível em <<https://doi.org/10.1021/es401749b>>.

COLLARINO, R. L. X.; TORKOMIAN, A. L. V. O Papel Dos Parques Tecnológicos No Estímulo À Criação De Spin-Offs Acadêmicas. **Perspectivas em Gestão & Conhecimento**, v. 5, n. 2, p. 201-225 2015. Disponível em: <<http://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/pgc>>.



COMISSÃO EUROPEIA. **Comunicação da comissão ao parlamento europeu, ao conselho, ao comité económico e social europeu e ao comité das regiões**. Bruxelas, 2014. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/social/BlobServlet?docId=11828&langId=pt>>

CONAMA. **Resolução CONAMA 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. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2011.

COPAM. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008**. 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. Diário do Executivo de Minas Gerais, 2008.

CORNWALL, D.; MACPHEE, M.; MUTTER, R.; NOVAK, J. T.; EDWARDS, M. Disposal of waste resulting from arsenic removal processes. London, **IWA Publishing**, 2004, 206 p.

CORTEZ, L. A. B. **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para Produtividade e Sustentabilidade**. Primeira edição, São Paulo, Blucher, 2010, 954 p.

COSTA, A. T.; NALINI, H. A.; DE LENA, J. C.; FRIESE, K.; MAGES, M. Surface water quality and sediment geochemistry in the Gualaxo do Norte basin, eastern Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Environmental Geology**, v. 45, n. 2, p. 226–235, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00254-003-0870-6>>.

COSTA, A. T.; NALINI JR, H. A.; CASTRO, P. de T. A.; TATUMI, S. H. Análise estratigráfica e distribuição do arsênio em depósitos sedimentares quaternários da porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, bacia do Ribeirão do Carmo, MG. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 4, p. 703–714, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000400017>>.

CPC. **Pronunciamento Técnico CPC 27 - Ativo Imobilizado**. Comitê de Pronunciamentos Contábeis, 2009. Disponível em: <[http://static.cpc.aatb.com.br/Documentos/316\\_CPC\\_27\\_rev 14.pdf](http://static.cpc.aatb.com.br/Documentos/316_CPC_27_rev 14.pdf)>.

CUNHA, P. R.; DUARTE, A. S. Remoção de arsênio em águas para consumo humano. **Associação Portuguesa de Engenharia Sanitária e Ambiental (APESB)**, 2008. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/1822/18504>>.

DATAFOLHA. **Ranking Universitário**. Folha de São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://ruf.folha.uol.com.br/2019/ranking-de-universidades/principal/>>. Acesso em: 7 out. 2020.

DE MATOS, L. P.; COSTA, P. F.; MOREIRA, M.; GOMES, P. C. S.; DE QUEIROZ SILVA, S.; GURGEL, L. V. A.; TEIXEIRA, M. C. Simultaneous removal of sulfate and arsenic using immobilized non-traditional SRB mixed culture and alternative low-cost carbon sources. **Chemical Engineering Journal**, v. 334, p. 1630–1641, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.035>>.

DESCHAMPS, E.; CIMINELLI, V. S. T.; LANGE, F. T.; MATSCHULLAT, J.; RAUE, B.; SCHMIDT, H. Soil and sediment geochemistry of the iron quadrangle, Brazil the case of arsenic. **Journal of Soils and Sediments**, v. 2, n. 4, p. 216–222, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF02991043>>.

DING, S.-Y.; HIMMEL, M. E. The Maize Primary Cell Wall Microfibril: A New Model Derived from Direct Visualization. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 54, n. 3, p. 597–606, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/jf051851z>>.

ELIAS, M. M. C.; FERREIRA, G. M. D.; DE ALMEIDA, F. T. R.; ROSA, N. C. M.; SILVA, I. A.; FILGUEIRAS, J. G.; DE AZEVEDO, E. R.; DA SILVA, L. H. M.; MELO, T. M. S.; GIL, L. F.; GURGEL, L. V. A. Synthesis and application of sugarcane bagasse cellulose mixed esters. Part I: Removal of  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$  from single spiked aqueous solutions in batch mode using sugarcane bagasse cellulose succinate phthalate. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 533, p. 678–691, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.08.109>>.

EXÉRCITO BRASILEIRO. Comando Logístico. **Portaria nº 56 - COLOG, de 5 de junho de 2017**. Dispõe sobre procedimentos administrativos para a concessão, a revalidação, o apostilamento e o cancelamento de registro no Exército para o exercício de atividades com produtos controlados e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2017.

EXÉRCITO BRASILEIRO. Comando Logístico. **Portaria nº 118 - COLOG, de 4 de outubro de 2019**. Dispõe sobre a lista de Produtos Controlados pelo Exército e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2019.

EXÉRCITO BRASILEIRO. Departamento Logístico. **Portaria nº 5 - D LOG, de 2 de março de 2005**. Normatiza a concessão e a revalidação de registros, apostilamentos e avaliações técnicas de produtos controlados pelo Exército, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2005.

EXÉRCITO BRASILEIRO. **Produtos Controlados**. Disponível em: <[https://www.eb.mil.br/web/ingresso/duvidas-mais-frequentes/-/asset\\_publisher/ckAykoibxYRW/content/produtos-controlados](https://www.eb.mil.br/web/ingresso/duvidas-mais-frequentes/-/asset_publisher/ckAykoibxYRW/content/produtos-controlados)>. Acesso em: 23 mar. 2021.

FELDMAN, D. Wood—chemistry, ultrastructure, reactions, by D. Fengel and G. Wegener, Walter de Gruyter, Berlin and New York, 1984, 613 pp. Price: 245 DM. **Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition**, v. 23, n. 11, p. 601–602, 1985. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/pol.1985.130231112>>.

FENGEL, D.; WEGENER, G.; GREUNE, A. Studies on the delignification of spruce wood by organosolv pulping using SEM-EDXA and TEM. **Wood Science and Technology**, v. 23, n. 2, p. 123–130, 1989. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00350934>>.

FIDELES, R. A.; TEODORO, F. S.; XAVIER, A. L. P.; ADARME, O. F. H.; GIL, L. F.; GURGEL, L. V. A. Trimellitated sugarcane bagasse: A versatile adsorbent for removal of cationic dyes from aqueous solution. Part II: Batch and continuous adsorption in a bicomponent system. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 552, p. 752–763, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.05.089>>.

FIESP. **OUTLOOK FIESP PROJEÇÕES PARA O AGORNEGÓCIO BRASILEIRO 2029**. São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://apps.fiesp.com.br/flipbook/files/assets/basic-html/page-1.html>>.

FORTEC - FÓRUM NACIONAL DE GESTORES DE INOVAÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA. Coleção PROFINIT. **Série Prospecção Tecnológica**, vol 2., 2019. Disponível em: <<https://profnit.org.br/wp-content/uploads/2019/02/PROFNIT-Serie-Prospeccao-Tecnologica-Volume-2.pdf>>.

FU, F.; WANG, Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 3, p. 407–418, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>>.

GARRIDO HOYOS, S.; AVILÉS FLORES, M.; RAMÍREZ GONZALEZ, A.; GRAJEDA FAJARDO, C.; CARDOSO ZOLOETA, S.; VELÁSQUEZ OROZCO, H.

Comparing Two Operating Configurations in a Full-Scale Arsenic Removal Plant. Case Study: Guatemala. **Water**, v. 5, n. 2, p. 834–851, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w5020834>>.

GIBERTINI, T. **Como funciona uma Empresa Júnior?** Brasil Junior, 2020. Disponível em: <<https://brasiljunior.org.br/conteudos/como-funciona-uma-empresa-junior-descubra-agora>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

GIMEZEZ, A. M. N.; BONACELLI, M. B. M.; BAMBINI, M. D. O Novo Marco Legal de Ciência, Tecnologia e Inovação no Brasil: desafios para a universidade?. **Desenvolvimento em Debate**, v. 6, n. 2, p. 98–119, 2018. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/dd/article/view/32171/18229>>.

GOVERNO FEDERAL. **Comex Stat**. Portal para acesso gratuito às estatísticas de comércio exterior do Brasil. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>>. Acesso em: 9 mar. 2021.

GUERRA, M. B. B.; TEANEY, B. T.; MOUNT, B. J.; ASUNSKIS, D. J.; JORDAN, B. T.; BARKER, R. J.; SANTOS, E. E.; SCHAEFER, C. E. G. R. Post-catastrophe Analysis of the Fundão Tailings Dam Failure in the Doce River System, Southeast Brazil: Potentially Toxic Elements in Affected Soils. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 228, n. 7, p. 252, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11270-017-3430-5>>.

GURGEL, L. V. A.; FREITAS, R. P. de; GIL, L. F. Adsorption of Cu(II), Cd(II), and Pb(II) from aqueous single metal solutions by sugarcane bagasse and mercerized sugarcane bagasse chemically modified with succinic anhydride. **Carbohydrate Polymers**, v. 74, n. 4, p. 922–929, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.05.023>>.

GUSMÃO, K. A. G.; GURGEL, L. V. A.; MELO, T. M. S.; CARVALHO, C. de F.; GIL, L. F. Adsorption studies of etherdiamine onto modified sugarcane bagasses in aqueous solution. **Journal of Environmental Management**, v. 133, p. 332–342, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.040>>.

HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 1, p. 10–18, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>>.

HERING, J. G.; KATSOYIANNIS, I. A.; THEODULOZ, G. A.; BERG, M.; HUG, S. J. Arsenic Removal from Drinking Water: Experiences with Technologies and Constraints in Practice. **Journal of Environmental Engineering**, v. 143, n. 5, p. 03117002, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0001225>>

HERRERA ADARME, O. F.; BAËTA, B. E. L.; ALVES GURGEL, L. V.; DE ÁVILA RODRIGUES, F.; AQUINO, S. F. de. Is anaerobic co-digestion the missing link to integrate sugarcane biorefinery? **Renewable Energy**, v. 195, p. 488–496, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.018>>.

HUG, S. J.; LEUPIN, O. X.; BERG, M. Bangladesh and Vietnam: Different groundwater compositions require different approaches to arsenic mitigation. **Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 17, p. 6318–6323, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/es7028284>>.

IBGE. **Censo demográfico brasileiro de 2010**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 19 jul. 2022.

INGRAM, C. **The drinking water book: How to eliminate the most harmful**

**toxins from your water.** 2<sup>nd</sup> Edition, Toronto, Celestial Arts, 2006, 185 p.

IPEA. **ODS 6 assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos.** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2019a. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods6.html>>.

IPEA. **ODS 12 Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis**Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2019b. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/ods/ods12.html>>.

KADLA, J.; GILBERT, R. D. Cellulose structure: a review. **Cellulose Chemical Technology**, v. 34, p. 197, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/npg.els.0003892>>.

KATSOYIANNIS, I. A.; MITRAKAS, M.; ZOUBOULIS, A. I. Arsenic occurrence in Europe: emphasis in Greece and description of the applied full-scale treatment plants. **Desalination and Water Treatment**, v. 54, n. 8, p. 2100–2107, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19443994.2014.933630>>.

KATSOYIANNIS, I. A.; ZOUBOULIS, A. I. Application of biological processes for the removal of arsenic from groundwaters. **Water Research**, v. 38, n. 1, p. 17–26, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.09.011>>.

KIM, T. S.; HIRAO, T.; IKEDA, I. Preparation of bis-quaternary ammonium salts from epichlorohydrin. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 73, n. 1, p. 67–71, 1996. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF02523450>>.

KJELLIN, M.; JOHANSSON, I. **Surfactants from Renewable Resources.** 1<sup>st</sup> edition, United Kingdom, John Wiley & Sons Ltd. 2010, 352 p.

KNAPPETT, P. S. K.; ESCAMILLA, V.; LAYTON, A.; MCKAY, L. D.; EMCH, M.; WILLIAMS, D. E.; HUQ, R.; ALAM, J.; FARHANA, L.; MAILLOUX, B. J.; FERGUSON, A.; SAYLER, G. S.; AHMED, K. M.; VAN GEEN, A. Impact of population and latrines on fecal contamination of ponds in rural Bangladesh. **Science of The Total Environment**, v. 409, n. 17, p. 3174–3182, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.043>>.

KUMAR, R.; PATEL, M.; SINGH, P.; BUNDSCHUH, J.; PITTMAN, C. U.; TRAKAL, L.; MOHAN, D. Emerging technologies for arsenic removal from drinking water in rural and peri-urban areas: Methods, experience from, and options for Latin America. **Science of the Total Environment**, v. 694, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.233>>.

LABSYNTH. **Epicloridrina - Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico.** 2017a. Disponível em: <<https://www.labsynth.com.br/fispq/FISPQ-Epicloridrina.pdf>>.

LABSYNTH. **Álcool Etilico 95% - Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico.** 2017b. Disponível em: <<https://www.labsynth.com.br/fispq/FISPQ-Alcool Etilico 95.pdf>>.

LABSYNTH. **Éter Etilico - Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico.** 2017c. Disponível em: <<https://www.labsynth.com.br/fispq/FISPQ-Eter Etilico.pdf>>.

LAZERTE, J. D. Market Pull/Technology Push. **Research-Technology Management**, v. 32, n. 2, p. 25–29, 1989. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/08956308.1989.11670583>>.

LEITE, B. R. de A.; MUSSI, R. G. da S.; SANTOS, R. de L.; NEVES, E. A. das;

FREY, I. A. **Sistema de inovação da aeronáutica: modelo sistêmico para gestão da inovação**. V Encontro Nacional de Propriedade Intelectual, 2019.

LENNTECH®. **Resinex™ TPX-9002: Ion exchange resin for arsenic removal**. Disponível em: <<https://www.lennotech.com/Data-sheets/Resinex-RX-TPX9002-L.pdf>>. Acesso em: 1 fev. 2022a.

LENNTECH®. **No TitleGEH 102 | Granular Ferric Hydroxide for Arsenic Removal from Drinking Water**. Disponível em: <[https://www.lennotech.com/Data-sheets/GEH\\_102\\_Arsenic\\_en-L.pdf](https://www.lennotech.com/Data-sheets/GEH_102_Arsenic_en-L.pdf)>. Acesso em: 1 fev. 2022b.

LEUDJO TAKA, A.; KLINK, M. J.; YANGKOU MBIANDA, X.; NAIDOO, E. B. Chitosan nanocomposites for water treatment by fixed-bed continuous flow column adsorption: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 255, p. 117398, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117398>>.

LI, B.; ZHANG, Q.; XIA, Y.; GAO, Z. Surface properties and aggregation behavior of cationic gemini surfactants with dipropylammonium head-groups. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 470, p. 211–217, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2015.02.005>>.

LI, M.; CHEN, Z. **Synthesis and characterization of polyepichlorohydrin-triethylamine quaternary ammonium salt**. Disponível em: <[https://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTotal-CHEM201104005.htm](https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-CHEM201104005.htm)>. Acesso em: 2 maio. 2021.

LI, T.; CHEN, C.; BROZENA, A. H.; ZHU, J. Y.; XU, L.; DRIEMEIER, C.; DAI, J.; ROJAS, O. J.; ISOGAI, A.; WÄGBERG, L.; HU, L. Developing fibrillated cellulose as a sustainable technological material. **Nature**, v. 590, n. 7844, p. 47–56, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41586-020-03167-7>>.

LIU, K.; DU, H.; ZHENG, T.; LIU, H.; ZHANG, M.; ZHANG, R.; LI, H.; XIE, H.; ZHANG, X.; MA, M.; SI, C. Recent advances in cellulose and its derivatives for oilfield applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 259, p. 117740, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117740>>.

MAHMOOD, T.; DIN, S. U.; NAEEM, A.; MUSTAFA, S.; WASEEM, M.; HAMAYUN, M. Adsorption of arsenate from aqueous solution on binary mixed oxide of iron and silicon. **Chemical Engineering Journal**, v. 192, p. 90–98, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.03.048>>.

MAIA, L. C. **Síntese e aplicação de um bioadsorvente preparado a partir da modificação química de bagaço de cana para remoção de arsênio**. 2020. 133 f. Qualificação de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

MAIA, L. C.; CARVALHO, M. M. C. E.; SOARES, L. C.; GURGEL, L. V. A. **Synthesis of a new adsorbent , from sugarcane bagasse , for removal of As ( V ) from aqueous solution : using an agricultural waste to water treatment**. 13º Encontro Brasileiro de Adsorção, 2020.

MAIA, L. C.; SOARES, L. C.; GURGEL, L. V. A. A review on the use of lignocellulosic materials for arsenic adsorption. **Journal of Environmental Management**, v. 288, p. 112397, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112397>>.

MALIK, D. S.; JAIN, C. K.; YADAV, A. K. Heavy Metal Removal by Fixed-Bed Column - A Review. **ChemBioEng Reviews**, v. 5, n. 3, p. 173–179, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/cben.201700018>>.

MANTOVANI, D. M. N.; GRANITO, R. A. N.; CABRAL, D. G.; LEITE, M. F.



B. O papel das incubadoras de empresas no desenvolvimento local: um estudo de caso. **Revista de Administração e Inovação**, v. 3, p. 90–101, 2006. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/rai/article/view/79058/83130>>.

MAURYA, D. P.; SINGLA, A.; NEGI, S. An overview of key pretreatment processes for biological conversion of lignocellulosic biomass to bioethanol. **3 Biotech**, v. 5, n. 5, p. 597–609, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13205-015-0279-4>>.

MERCK. **Website de busca de produtos Merck**. Disponível em: <<https://www.sigmaaldrich.com/brazil.html>>. Acesso em: 3 mar. 2021.

MINISTÉRIO DA JUSTIÇA E SEGURANÇA PÚBLICA. **Portaria nº 240, de 12 de março de 2019**. Estabelece procedimentos para o controle e a fiscalização de produtos químicos e define os produtos químicos sujeitos a controle pela Polícia Federal. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2019.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria n.º 518, de 25 de março de 2004**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2004.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília (DF), 2021.

MULTICHEMIE. **Trietilamina - Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico**. 2011. Disponível em: <<http://multichemie.com.br/pdfs/trietilamina.pdf>>.

NAINI, G. Synthesis of a new cyclic ether quaternary ammonium cationic surfactant under ultrasonic condition. **Petrochemical Technology**, n. 47(9), p. 991–995, 2018.

NASA. **Technology Readiness Level**. Disponível em: <[https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt\\_accordion1.html](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html)>. Acesso em: 17 fev. 2021.

NASCIMENTO, R. F. do; LIMA, A. C. A. de; VIDAL, C. B.; MELO, D. de Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 2ª edição, Fortaleza, Imprensa Universitária, 2014, 309 p.

NEGAHDAR, L.; DELIDOVICH, I.; PALKOVITS, R. Aqueous-phase hydrolysis of cellulose and hemicelluloses over molecular acidic catalysts: Insights into the kinetics and reaction mechanism. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 184, p. 285–298, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.11.039>>.

NSF. **Drinking Water System Components - Health Effects**. NSF/ANSI 61. American National Standard (ANSI), 2016.

NSF. **Publications Output: U.S. Trends and International Comparisons**. National Science Foundation. Disponível em: <<https://nces.nsf.gov/pubs/nsb20206/publication-output-by-region-country-or-economy>>. Acesso em: 5 out. 2020.

OECD. **The Bioeconomy to 2030: Designing a policy agenda**. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1787/9789264056886-en>>.

OMPI. **Manual de redação de patentes**. Organização Mundial da Propriedade Intelectual, 2014.

ONU. **Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Organização das Nações Unidas, Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais, 2015.

PAIVA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. **Introdução à espectroscopia**. BARROS, P.; TORREJON R. (trad.), 4ª edição, Washington, CENGAGE Learning, 2010, 733 p.

PARLAMENTO EUROPEU. **Economia circular: definição, importância e benefícios**. Disponível em: <<https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios>>. Acesso em: 1 ago. 2022.

PATEL, H. Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review. **Applied Water Science**, v. 9, n. 3, p. 45, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13201-019-0927-7>>.

PENG, P.; SHE, D. Isolation, structural characterization, and potential applications of hemicelluloses from bamboo: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 112, p. 701–720, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.06.068>>.

PEREIRA, F. V.; GURGEL, L. V. A.; GIL, L. F. Removal of Zn<sup>2+</sup> from aqueous single metal solutions and electroplating wastewater with wood sawdust and sugarcane bagasse modified with EDTA dianhydride (EDTAD). **Journal of Hazardous Materials**, v. 176, n. 1–3, p. 856–863, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.115>>.

PETRUSEVSKI, B.; SHARMA, S.; SCHIPPERS, J. C.; SHORDT, K. Arsenic in Drinking Water. **International Water and Sanitation Centre (IRC)**, 2007. Disponível em: <[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/PETRUSEVSKI et al 2007 Arsenic in Drinking Water.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/PETRUSEVSKI_et_al_2007_Arsenic_in_Drinking_Water.pdf)>.

POLÍCIA FEDERAL. **Obter Cadastramento e Licença para Controle de Produtos Químicos**. Disponível em: <<http://www.pf.gov.br/servicos-pf/carta-de-servicos/produtos-quimicos/obter-cadastramento-e-licenca-para-controle-de-produtos-quimicos>>. Acesso em: 23 mar. 2021.

PUCCINI, A. D. L. **Matemática Financeira - Objetiva e Aplicada**. 10ª edição. São Paulo, Saraiva, 2017, 384 p.

PUROLITE®. **Purolite® FerrIX™A33E: Polystyrenic Macroporous**. Disponível em: <<https://www.purolite.com/product/ferrixa33e>>. Acesso em: 1 fev. 2022.

QUÍMICA MODERNA. **Dimetilformamida - Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico**. 2012. Disponível em: <[http://www.quimicamoderna.net.br/fispq/FISQPQ\\_413190.pdf](http://www.quimicamoderna.net.br/fispq/FISQPQ_413190.pdf)>.

RAMOS, S. N. do C.; XAVIER, A. L. P.; TEODORO, F. S.; ELIAS, M. M. C.; GONÇALVES, F. J.; GIL, L. F.; DE FREITAS, R. P.; GURGEL, L. V. A. Modeling mono- and multi-component adsorption of cobalt(II), copper(II), and nickel(II) metal ions from aqueous solution onto a new carboxylated sugarcane bagasse. Part I: Batch adsorption study. **Industrial Crops and Products**, v. 74, p. 357–371, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.022>>.

RAMOS, S. N. do C.; XAVIER, A. L. P.; TEODORO, F. S.; GIL, L. F.; GURGEL, L. V. A. Removal of cobalt(II), copper(II), and nickel(II) ions from aqueous solutions using phthalate-functionalized sugarcane bagasse: Mono- and multicomponent adsorption in batch mode. **Industrial Crops and Products**, v. 79, p. 116–130, 2016.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.035>>.

RASPOLLI GALLETTI, A. M.; D'ALESSIO, A.; LICURSI, D.; ANTONETTI, C.; VALENTINI, G.; GALIA, A.; NASSI O DI NASSO, N. Midinfrared FT-IR as a tool for monitoring herbaceous biomass composition and its conversion to furfural. **Journal of Spectroscopy**, v. 2015, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2015/719042>>.

RATHI, B. S.; KUMAR, P. S. A review on sources, identification and treatment strategies for the removal of toxic Arsenic from water system. **Journal of Hazardous Materials**, v. 418, n. June, p. 126299, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126299>>.

REIMANN, C.; MATSCHULLAT, J.; BIRKE, M.; SALMINEN, R. Arsenic distribution in the environment: The effects of scale. **Applied Geochemistry**, v. 24, n. 7, p. 1147–1167, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.03.013>>.

REIS, T. **Taxa Interna de Retorno: o que é e como calcular a TIR?** Disponível em: <<https://www.suno.com.br/artigos/taxa-interna-de-retorno/>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

REIS, T. **TMA: entenda o que é a Taxa Mínima de Atratividade e como calculá-la.** Disponível em: <<https://www.suno.com.br/artigos/taxa-minima-de-atratividade/>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

RIAL, J. B.; FERREIRA, M. L. Potential applications of spent adsorbents and catalysts: Re-valorization of waste. **Science of the Total Environment**, v. 823, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153370>>.

RICCI, C. G.; CABRERA, M. I.; LUNA, J. A.; GRAU, R. J. A convenient synthesis of quaternary ammonium gemini surfactants from long-chain alkyl dimethylamines and epichlorohydrin. **Synlett**, n. 11, p. 1811–1814, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1055/s-2002-34876>>.

RICE, E. W.; BAIRD, R. B.; EATON, A. D. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23rd Edition. Washington, DC. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 2017.

ROCHA, G. J. de M.; NASCIMENTO, V. M.; GONÇALVES, A. R.; SILVA, V. F. N.; MARTÍN, C. Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental and physical–chemical composition. **Industrial Crops and Products**, v. 64, p. 52–58, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.003>>.

SAHA, B. C. Hemicellulose bioconversion. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 30, n. 5, p. 279–291, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10295-003-0049-x>>.

SAKUMA, A. M.; CAPITANI, E. M. De; FIGUEIREDO, B. R.; MAIO, F. D. de; PAOLIELLO, M. M. B.; CUNHA, F. G. da; DURAN, M. C. Arsenic exposure assessment of children living in a lead mining area in Southeastern Brazil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 26, n. 2, p. 391–398, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0102-311X2010000200018>>.

SANTOS, E. C. de O.; JESUS, I. M. de; BRABO, E. da S.; FAYAL, K. F.; SÁ FILHO, G. C.; LIMA, M. de O.; MIRANDA, A. M. M.; MASCARENHAS, A. S.; SÁ, L. L. C. de; SILVA, A. P. da; CÂMARA, V. de M. Exposição ao mercúrio e ao arsênio em Estados da Amazônia: síntese dos estudos do Instituto Evandro Chagas/FUNASA. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 6, n. 2, p. 171–185, 2003. Disponível em:



<<https://doi.org/10.1590/S1415-790X2003000200010>>.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H. de; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000500025>>.

SARKAR, S.; GREENLEAF, J. E.; GUPTA, A.; GHOSH, D.; BLANEY, L. M.; BANDYOPADHYAY, P.; BISWAS, R. K.; DUTTA, A. K.; SENGUPTA, A. K. Evolution of community-based arsenic removal systems in remote villages in West Bengal, India: Assessment of decade-long operation. **Water Research**, v. 44, n. 19, p. 5813–5822, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.072>>.

SBQ. **Movimento Química Pós 2022 – Sustentabilidade e Soberania**. Disponível em: <<http://www.s bq.org.br/mqp2022/>>. Acesso em: 19 jul. 2022.

SCHÖNIGER, W. Die mikroanalytische Schnellbestimmung von Halogenen und Schwefel in organischen Verbindungen. **Mikrochimica Acta**, v. 44, n. 4–6, p. 869–876, 1956. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF01262130>>.

SEBRAE. **Conheça os três Regimes tributários**. Disponível em: <<https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ufs/ap/artigos/conheca-os-tres-regimes-tributarios,1ddf8178de8c5610VgnVCM1000004c00210aRCRD>>. Acesso em: 2 ago. 2022.

SECRETARIA NACIONAL DA FAMÍLIA. **Famílias e Filhos no Brasil**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdh/pt-br/navegue-por-temas/observatorio-nacional-da-familia/fatos-e-numeros>>. Acesso em: 1 ago. 2022.

SHAH, G. D.; PANSARE, V. S.; MULAY, V. N. A modified micro-dumas method for rapid determination of nitrogen. **Mikrochimica Acta**, v. 44, n. 7–8, p. 1140–1143, 1956. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF01257446>>.

SHASTRI, A.; DAS, A. K.; KRISHNAKUMAR, S.; SINGH, P. J.; RAJA SEKHAR, B. N. Spectroscopy of N, N -dimethylformamide in the VUV and IR regions: Experimental and computational studies. **Journal of Chemical Physics**, v. 147, n. 22, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.5006126>>.

SIGDEL, A.; PARK, J.; KWAK, H.; PARK, P.-K. Arsenic removal from aqueous solutions by adsorption onto hydrous iron oxide-impregnated alginate beads. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 35, p. 277–286, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.01.005>>.

SILVA, D. de C.; BELLATO, C. R.; MARQUES NETO, J. de O.; FONTES, M. P. F. Trace elements in river waters and sediments before and after a mining dam breach (Bento Rodrigues, Brazil). **Química Nova**, v. 41, n. 8, p. 857–866, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170252>>.

SILVA, A. G. da; VASCONCELOS, E. P.; SILVA, G. G.; SOUZA, L. V. de; FRANCO, M. R.; SPEZIALI, M. G.; OLIVEIRA, M. P. D. de; SOUZA, P. M. T. G. de; LAGO, R. M.; CASTRO, V. G. de. **Guia prático de escalonamento de tecnologias (e-book)**. Belo Horizonte. Pré-lançamento. SBQ. 2019a. 128p.

SILVA, R. de C. F. da; SILVA, F. B. V. da; BIONDI, C. M.; NASCIMENTO, C. W. A. do; OLIVEIRA, E. C. A. de. Assessing the Content of Micronutrients in Soils and Sugarcane in Different Pedogeological Contexts of Northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, 2019b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20180228>>.

SILVA, I.; NASCIMENTO, P.; LAGO, R.; RAMOS, M.; GALEMBECK, F.;

ROCHA FILHO, R.; TEIXEIRA, A. P. Movimento química pós 2022: construção de um plano de ação para que a química e seus atores impactem a sustentabilidade e soberania no Brasil. **Química Nova**, 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170898>>.

SINGH, R. V.; SHARMA, P.; SAMBYAL, K. Application of Sugarcane Bagasse in Chemicals and Food Packaging Industry: Potential and Challenges. **Circular Economy and Sustainability**, n. 0123456789, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s43615-022-00167-9>>.

SOLVAY. **Solvay Epicerol® Earns Roundtable on Sustainable Biomaterials Certification**. Disponível em: <<https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-epicerol-earns-roundtable-sustainable-biomaterials-certification>>. Acesso em: 15 jul. 2022.

SPEZIALI, M. G. **Fundamentos de patentes para estudantes dos cursos de química, farmácia e engenharia química**. 1ª edição. Belo Horizonte. Edição do autor. 2020. 281p.

SULLIVAN, C.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C. R.; GRAHAM, N. J. D. Disposal of water treatment wastes containing arsenic — A review. **Science of The Total Environment**, v. 408, n. 8, p. 1770–1778, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.01.010>>.

SUNRESIN®. **SEPLITE® LAR714: Iron loaded type, used for highly arsenic removal**. Disponível em: <<https://www.seplite.com/chelating-resin-lar714.html>>. Acesso em: 1 fev. 2022.

TEIXEIRA, M. C.; SANTOS, A. C.; FERNANDES, C. S.; NG, J. C. Arsenic contamination assessment in Brazil – Past, present and future concerns: A historical and critical review. **Science of the Total Environment**, v. 730, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138217>>.

TEODORO, F. S.; SOARES, L. C.; FILGUEIRAS, J. G.; DE AZEVEDO, E. R.; PATIÑO-AGUDELO, Á. J.; ADARME, O. F. H.; DA SILVA, L. H. M.; GURGEL, L. V. A. Batch and continuous adsorption of Cu(II) and Zn(II) ions from aqueous solution on bi-functionalized sugarcane-based biosorbent. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 18, p. 26425–26448, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-021-17549-5>>.

THIRUNAVUKKARASU, A.; NITHYA, R.; SIVASHANKAR, R. Continuous fixed-bed biosorption process: A review. **Chemical Engineering Journal Advances**, v. 8, p. 100188, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100188>>.

TITAN WATER PRO®. **Water Filter Alumina Activated Fluoride/Arsenic Reduction**. Disponível em: <[https://titanwaterpro.com/products/water-filter-alumina-activated-fluoride-arsenic-reduction-2x10-1-4npt?\\_pos=10&\\_sid=5b5e0a98b&\\_ss=r](https://titanwaterpro.com/products/water-filter-alumina-activated-fluoride-arsenic-reduction-2x10-1-4npt?_pos=10&_sid=5b5e0a98b&_ss=r)>. Acesso em: 15 jul. 2022.

TRESINTSI, S.; SIMEONIDIS, K.; ESTRADÉ, S.; MARTINEZ-BOUBETA, C.; VOURLIAS, G.; PINAKIDOU, F.; KATSIKINI, M.; PALOURA, E. C.; STAVROPOULOS, G.; MITRAKAS, M. Tetravalent Manganese Ferrioxhyte: A Novel Nano-adsorbent Equally Selective for As(III) and As(V) Removal from Drinking Water. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 17, p. 9699–9705, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/es4009932>>.

UNICEF. **ARSENIC PRIMER Guidance on the Investigation & Mitigation of Arsenic Contamination**. 2018.

UNITED NATIONS. **Resolution 64/292: The human right to water and sanitation**. 2010.

VAREJÃO, E. V. V.; BELLATO, C. R.; FONTES, M. P. F.; MELLO, J. W. V. Arsenic and trace metals in river water and sediments from the southeast portion of the Iron Quadrangle, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 172, n. 1–4, p. 631–642, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10661-010-1361-3>>.

VASCONCELLOS, E. P.; SOUZA, P. M. T. G. de; FRANCO, M. R.; CASTRO, V. G. de; SOUZA, L. V.; LAGO, R. M.; SPEZIALI, M. G. Escalonamento de tecnologias: desenvolvimento de produto e processo do laboratório à escala piloto conectado ao mercado (parte 1). **Química Nova**, v. x, n. 00, p. 1–8, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170665>>.

VERBINNEN, B.; BLOCK, C.; VAN CANEGHEM, J.; VANDECASTEELE, C. Recycling of spent adsorbents for oxyanions and heavy metal ions in the production of ceramics. **Waste Management**, v. 45, p. 407–411, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.006>>.

WEBER, W. J.; SMITH, E. H. Activated Carbon Adsorption: The State of the Art. **Studies in Environmental Science**, v. 29, p. 455–492, 1986. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)70958-0](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)70958-0)>.

WEERASUNDARA, L.; OK, Y. S.; BUNDSCHUH, J. Selective removal of arsenic in water: A critical review. **Environmental Pollution**, v. 268, p. 115668, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115668>>.

WHO. **Environmental Health Criteria 224 ARSENIC AND ARSENIC COMPOUNDS (Second Edition)**. p. 1–66, 2001.

WIPO. **Global Innovation Index 2021**. World Intellectual Property Organization - WIPO, 2021. Disponível em: <<https://www.globalinnovationindex.org/Home>>.

WORCH, E. **Adsorption Technology in Water Treatment**. Fundamentals, Processes, and Modeling, DE GRUYTER, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/9783110715507>>.

XAVIER, A. L. P.; ADARME, O. F. H.; FURTADO, L. M.; FERREIRA, G. M. D.; DA SILVA, L. H. M.; GIL, L. F.; GURGEL, L. V. A. Modeling adsorption of copper(II), cobalt(II) and nickel(II) metal ions from aqueous solution onto a new carboxylated sugarcane bagasse. Part II: Optimization of monocomponent fixed-bed column adsorption. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 516, p. 431–445, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.01.068>>.

XP. **Payback Descontado: o que é e como calcular?** Disponível em: <<https://blog.xpeducacao.com.br/payback-descontado/>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

XU, X.; GAO, B.; JIN, B.; YUE, Q. Removal of anionic pollutants from liquids by biomass materials: A review. **Journal of Molecular Liquids**, v. 215, p. 565–595, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2015.12.101>>.

YAMAN, S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 5, p. 651–671, 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890403001778>>.

YARRIS, L. **The Evolutionary Road to Biofuels**. Year of science. Disponível em: <<https://www2.lbl.gov/Publications/YOS/Feb/>>. Acesso em: 12 jun. 2022.

YOKOTA, H.; TANABE, K.; SEZAKI, M.; AKIYOSHI, Y.; MIYATA, T.; KAWAHARA, K. Arsenic contamination of ground and pond water and water puri ®

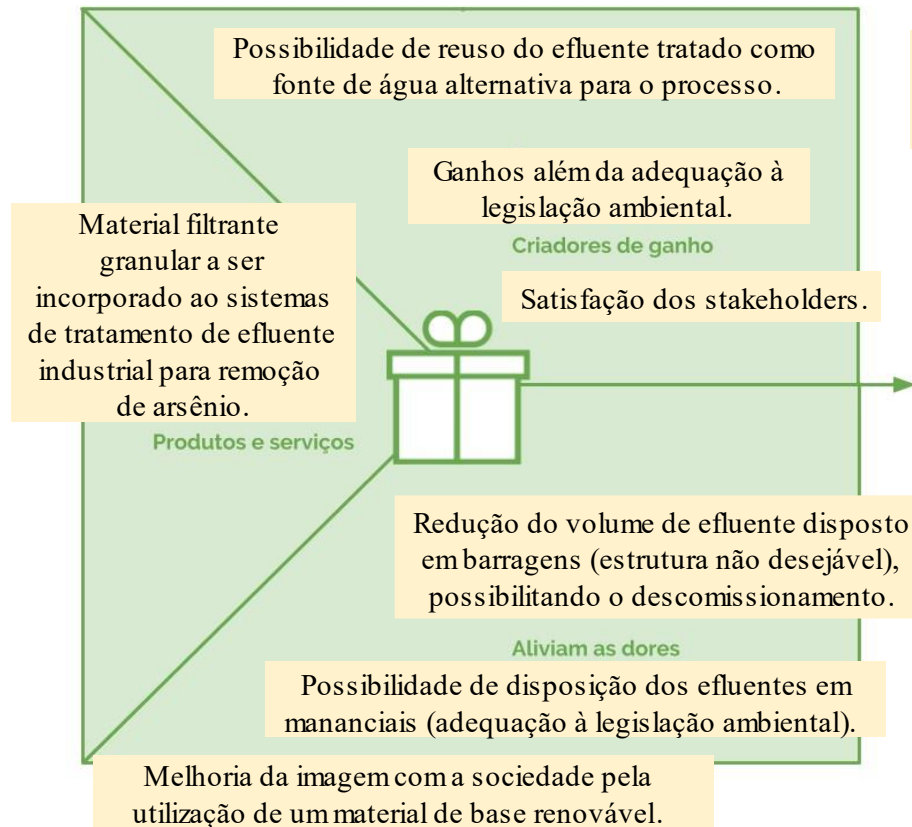
cation system using pond water in Bangladesh. v. 60, p. 323–331, 2001. Disponível em:  
<[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00112-5)>.

**APÊNDICE I****FERRAMENTAS DE INOVAÇÃO UTILIZADAS NO PROGRAMA DE PRÉ-  
ACELERAÇÃO IDEIAZ**

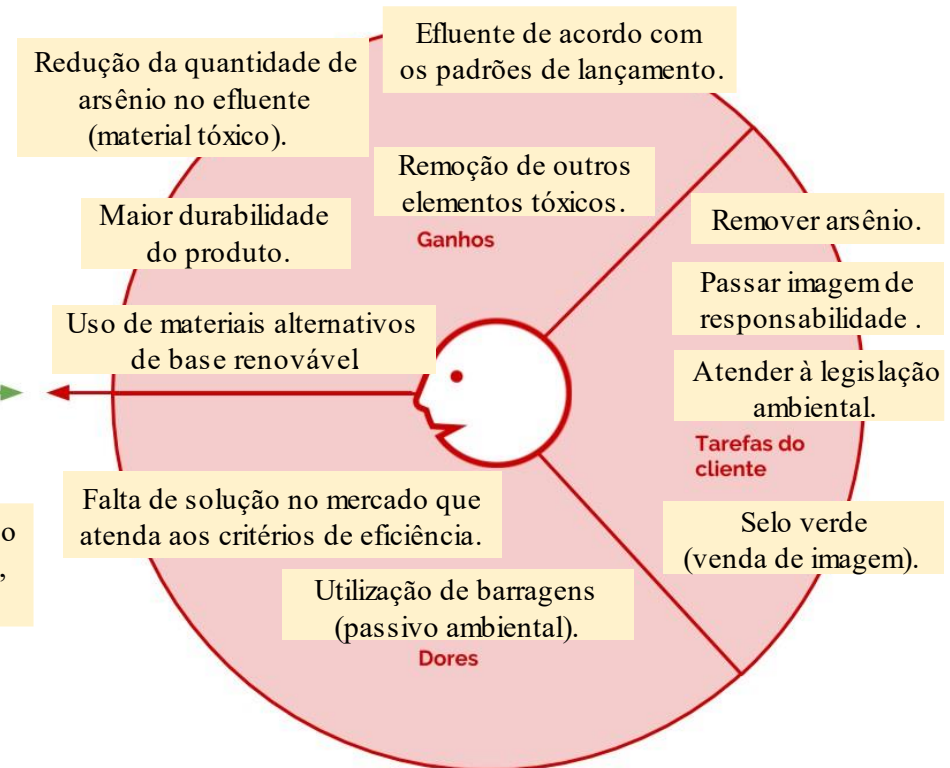
## Jornada do Cliente

	Atração	Avaliação	Contratação	Utilização	Pós-compra
Ações do cliente	Ter a necessidade de atender aos padrões legais de disposição de efluentes contendo arsênio.	Comparar com os materiais concorrentes (custo e eficiência) e cadastro da empresa como fornecedor.	Entrar em contato com o responsável pela solução, negociar proposta comercial e contratar.	Implementar e verificar a eficiência do sistema de tratamento do efluente.	Monitorar o sistema para identificar a necessidade de troca e buscar reposição do produto.
Consequências	Receio de dispor o efluente contaminado com arsênio em barragens.	Alívio por saber que existem opções no mercado.	Ansiedade com a implementação do sistema na planta.	Nível de satisfação com a implementação do sistema na planta.	Nível de satisfação com o desempenho do produto.
Ações da startup	Divulgação do produto em redes de parceiros.	Enviar a proposta comercial, apresentar os cases de sucesso e destacar os ganhos com a aplicação da tecnologia.	Facilitar o processo de compra e auxiliar na tomada de decisão.	Entregar o produto e o dimensionamento do sistema, disponibilizar manual de instalação e operações do sistema.	Coletar informações para otimização do produto e sobre a satisfação do cliente, além de manter contato para celebração de novos contratos.

## Proposta de Valor



## Perfil do Cliente





# MODELO C

## CAPACIDADE ORGANIZACIONAL

### equipe

Quem fará parte? 02 engenheiros ambientais, 01 engenheira química e 01 engenheiro de produção. Quais os papéis e talentos? Responsáveis técnicos, comerciais e operacionais.

### parceiros

Parceiros? UFOP empresas de projetos ambientais.  
 Competidores? Resinas de troca aniônica e zeólitas.  
 Fornecedores? Usinas sucroalcooleiras, ind. de insumos químicos.

### atividades-chave

Atividades? Produção do bioadsorvente, dimensionamento do sistema, venda do produto.

### recursos

Quais recursos necessário para fazer acontecer? Know-how, equipamentos e insumos. O que precisamos? Aumento de escala.

### custos

Qual nossa estrutura de custos? Recursos humanos (produção e dimensionamento), insumos (bagaço de cana-de-açúcar e produtos químicos), infraestrutura (aluguel de equipamentos) e logística.

## RESULTADO FINANCEIRO

O resultado financeiro está ligado ao investimento em equipamentos necessários para a montagem de uma planta de produção do material para o atendimento de determinada demandada mensal. Os testes para a determinação da quantidade de material por m<sup>3</sup> de efluente ainda não foram finalizados.

## FLUXO DO NEGÓCIO

### OPORTUNIDADE DE MERCADO

Existe alguma oportunidade comercial não atendida? Falta de soluções específicas para remoção de arsênio no mercado. Existe alguma oportunidade atrelada ao contexto do problema? Geração de água de reuso.

### clientes

Quem pagará pela solução? Quem usará da solução? Empreendimentos geradores de efluentes contendo arsênio. O usuário pagante será impactado? Sim, será atendida a legislação vigente de lançamento de efluente com possibilidade de redução dos custos de produção pela geração de água de reuso.

### proposta de valor

Qual solução será entregue ao cliente? Material filtrante em pó a ser incorporado ao sistemas de tratamento de efluente industrial para remoção de arsênio.  
 Qual o valor gerado ao cliente? O produto é biodegradável e de fonte renovável, além de ser reutilizado. Adequação à política ESG da mineradora com a possibilidade de exploração de um selo verde. Qual valor percebido e que necessidade atendemos? Melhoria da imagem do cliente diante da sociedade mitigando os possíveis impactos ambientais e sociais negativos.

### fontes de receita

De que maneira geramos recursos financeiros? Dimensionamento do sistema e venda do produto.  
 O que será entregue e de que maneira será pago pelo cliente? Será entregue o bioadsorvente e assistência técnica, cujo valor será cobrado por kg de material e horas de trabalho, respectivamente.

## TEORIA DE MUDANÇA

### CONTEXTO E PROBLEMA

Qual o problema social que vamos resolver?

Efluentes industriais contendo arsênio, elemento de elevada toxicidade responsável por causar impactos negativos ao ambiente e à saúde humana.

### público / foco do impacto

Qual o público? Quem será beneficiado pelo impacto?

População no entorno da mineração de ouro que pode ser direta ou indiretamente afetada pela contaminação dos recursos hídricos; impacto no equilíbrio do ecossistema pela contaminação com arsênio.

### intervenções (estratégias)

O que será feito? Fornecimento de um novo bioadsorvente para remoção de arsênio preparado a partir de um resíduo agrícola abundante no país (bagaço de cana-de-açúcar).

Quais as nossas macroatividades? (i) prospecção de clientes; (ii) produção do bioadsorvente; (iii) adequação do produto às demandas do cliente.

Quais são as nossas estratégias? Análise do mercado (potenciais mineradoras de ouro) para identificação da necessidade de investimento voltado ao aumento de escala de produção; dimensionamento do sistema de acordo com as especificidades do cliente; escalonamento da solução desenvolvida em escala de laboratório.

### saídas / outputs

Quais são as saídas mensuráveis? Ex.: quantidade de cursos realizados.

Quantidade de bioadsorvente produzida por batelada; volume de efluente tratado por massa de bioadsorvente aplicado.

### resultados curto prazo

Quais são os resultados iniciais a serem produzidos para alcançar o impacto?

Desempenho do bioadsorvente com o efluente do cliente.

### resultados médio prazo

Quais resultados intermediários expressam as mudanças no público ou dimensão de impacto?

Desempenho do processo de produção do bioadsorvente em maior escala.

### VISÃO DE IMPACTO

Descrição da situação social e/ou ambiental transformada

Remoção de arsênio do efluente para atender aos padrões de lançamento e/ou reuso industrial.



A estrutura visual do Modelo C foi apresentada para evidenciar a objetividade da ferramenta.

Transcrição do texto do Modelo C:

**Qual o problema social que vamos resolver?** Efluentes industriais contendo arsênio, elemento de elevada toxicidade responsável por causar impactos negativos ao ambiente e à saúde humana.

**Qual o público? Quem será beneficiado pelo impacto?** População no entorno da mineração de ouro que pode ser direta ou indiretamente afetada pela contaminação dos recursos hídricos; impacto no equilíbrio do ecossistema pela contaminação com arsênio.

**O que será feito?** Fornecimento de um novo bioadsorvente para remoção de arsênio preparado a partir de um resíduo agrícola abundante no país (bagaço de cana-de-açúcar).

**Quais as nossas macrotatividades?** (i) prospecção de clientes; (ii) produção do bioadsorvente; (iii) adequação do produto às demandas do cliente.

**Quais são as nossas estratégias?** Análise do mercado (potenciais mineradoras de ouro) para identificação da necessidade de investimento voltado ao aumento de escala de produção; dimensionamento do sistema de acordo com as especificidades do cliente; escalonamento da solução desenvolvida em escala de laboratório.

**Quais são as saídas mensuráveis?** Quantidade de bioadsorvente produzida por batelada; volume de efluente tratado por massa de bioadsorvente aplicado.

**Quais são os resultados iniciais a serem produzidos para alcançar o impacto?** Desempenho do bioadsorvente com o efluente do cliente.

**Quais resultados intermediários expressam as mudanças no público ou dimensão de impacto?** Desempenho do processo de produção do bioadsorvente em maior escala.

**Descrição da situação social e/ou ambiental transformada.** Remoção de arsênio do efluente para atender aos padrões de lançamento e/ou reuso industrial.

**Existe alguma oportunidade comercial não atendida?** Falta de soluções específicas para remoção de arsênio no mercado. **Existe alguma oportunidade atrelada ao contexto do problema?** Geração de água de reuso.

**Quem pagará pela solução? Quem usará da solução?** Empreendimentos geradores de efluentes contendo arsênio. **O usuário pagante será impactado?** Sim será atendida a legislação vigente de lançamento de efluente com possibilidade de redução dos custos de produção pela geração de água de reuso.

**Qual solução será entregue ao cliente?** Material filtrante granular a ser incorporado ao sistema de tratamento de efluente industrial para remoção de arsênio. **Qual o valor gerado ao cliente?** O produto é biodegradável e de fonte renovável, além de ser reutilizável. Adequação à política ESG da mineradora com a possibilidade de exploração de um selo verde. **Qual valor percebido e que necessidade atendemos?** Melhoria da imagem do cliente diante da sociedade mitigando os possíveis impactos ambientais e sociais negativos.

**De que maneira geramos recursos financeiros?** Dimensionamento do sistema e venda do produto. **O que será entregue e de que maneira será pago pelo cliente?** Será entregue o bioadsorvente e assistência técnica, cujo valor será cobrado por kg de material e horas de trabalho, respectivamente.

**Quem fará parte?** 02 engenheiros ambientais, 01 engenheira química e 01 engenheiro de produção. **Quais os papéis e talentos?** Responsáveis técnicos, comerciais e operacionais. **Parceiros?** UFOP e empresas de projetos ambientais. **Competidores?** Resinas de troca aniônica e zeólitas. **Fornecedores?** Usinas sucroalcooleiras e indústria de insumos químicos.

**Atividades?** Produção do bioadsorvente, dimensionamento do sistema, venda do produto. **Quais recursos necessários para fazer acontecer?** *Know-how*, equipamentos e insumos. **O que precisamos?** Aumento de escala. **Qual nossa estrutura de custos?** Recursos humanos (produção e dimensionamento), insumos (bagaço de cana-de-açúcar e produtos químicos), infraestrutura (aluguel de equipamentos) e logística.

**Resultado financeiro?** O resultado financeiro está ligado ao investimento em equipamentos necessários para a montagem de uma planta de produção do material para o atendimento de determinada demanda mensal. Os testes para a determinação da quantidade de material por m<sup>3</sup> de efluente ainda não foram finalizados.

**ANEXO I****RELATÓRIO DAS ANÁLISES QUÍMICAS REALIZADAS PARA  
CERTIFICAÇÃO DO BAA PELO PADRÃO NSF/ANSI 61 – 2016**

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório 19347/2022.0

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

Laboratório de ensaios acreditado na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025

O escopo de acreditação pode ser visto em:

<http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rble/docs/CRL0462.pdf>

**Resultados Analíticos**

<b>Amostra</b>	Água potável usada em teste de Inocuidade - material adsorvente de ânions com granulometria de 100 mesh	<b>Nº Amostra</b>	19347-1/2022.1	<b>Coleta em</b>	22/04/2022 00:00
<b>Matriz</b>	Água Potável			<b>Recepção</b>	22/04/2022 16:30

Análise	Resultado	Unidade do Resultado	GM N°888/2021	Unidade da Legislação	LQ	Referência	Data Análise
Alumínio Total	< 0,050	mg/L	Máx. 0,2	mg/L	0,050	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Amônia	< 0,10	mg/L NH3	Máx. 1,2	mg/L	0,10	SMEWW 23ª Edição - Método 4500 NH3D	26/04/2022
Arsênio Total	< 0,01	mg/L	Máx. 0,01	mg/L	0,01	SMEWW 23ª edição - Método 3114 B	17/05/2022
Bário Total	< 0,020	mg/L	Máx. 0,7	mg/L	0,020	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Boro Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Cádmio Total	< 0,0010	mg/L	Máx. 0,003	mg/L	0,0010	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Cálcio Total	< 0,70	mg/L	-	-	0,70	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Chumbo Total	< 0,0050	mg/L	Máx. 0,01	mg/L	0,0050	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Cianeto Total	< 0,002	mg/L	-	-	0,002	SMEWW 23ª Edição - Método 4500 CN-	23/04/2022
Cloreto	< 1,00	mg/L	Máx. 250	mg/L	1,00	SMEWW 23ª Edição - Método 4110 B	05/05/2022
Cobalto Total	< 0,020	mg/L	-	-	0,020	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

Análise	Resultado	Unidade do Resultado	GM N°888/2021	Unidade da Legislação	LQ	Referência	Data Análise
Cobre Total	< 0,0010	mg/L	Máx. 2	mg/L	0,0010	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Cromo Total	< 0,010	mg/L	Máx. 0,05	mg/L	0,010	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Estanho Total	< 0,0010	mg/L	-	-	0,0010	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Ferro Total	< 0,020	mg/L	Máx. 0,3	mg/L	0,020	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Fluoreto	< 0,05	mg/L	Máx. 1,5	mg/L	0,05	SMEWW 23ª Edição - Método 4110 B	05/05/2022
Magnésio Total	< 0,020	mg/L	-	-	0,020	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Manganês Total	< 0,050	mg/L	Máx. 0,1	mg/L	0,050	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Mercúrio Total	< 0,0002	mg/L	Máx. 0,001	mg/L	0,0002	SMEWW 23ª Edição - Método - 3112B	17/05/2022
Níquel Total	< 0,0010	mg/L	Máx. 0,07	mg/L	0,0010	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Nitrato	0,67	mg/L	Máx. 10	mg/L	0,10	SMEWW 23ª Edição - Método 4110 B	05/05/2022
Nitrito	< 0,05	mg/L	Máx. 1	mg/L	0,05	SMEWW 23ª Edição - Método 4110 B	05/05/2022
Potássio Total	< 0,10	mg/L	-	-	0,10	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Prata Total	< 0,0020	mg/L	-	-	0,0020	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Sódio Total	< 0,30	mg/L	Máx. 200	mg/L	0,30	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Sulfato	< 1,00	mg/L	Máx. 250	mg/L	1,00	SMEWW 23ª Edição - Método 4110 B	05/05/2022

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

Análise	Resultado	Unidade do Resultado	GM N°888/2021	Unidade da Legislação	LQ	Referência	Data Análise
Sulfeto de Hidrogênio	< 0,002	mg/L	Máx. 0,05	mg/L	0,002	SMEWW 23ª Edição - Método - 4500 S-2 H	23/05/2022
Vanádio Total	< 0,0030	mg/L	-	-	0,0030	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022
Zinco Total	< 0,050	mg/L	Máx. 5	mg/L	0,050	SMEWW 23ª Edição - Método - 3030 B, D, F /3120B	18/05/2022

#### Informações de Campo

<b>Responsabilidade da Amostragem:</b> Contratante	<b>Coloração da Água:</b> Não se aplica
<b>Plano de Amostragem:</b> -	<b>Observações Gerais:</b> TESTE

#### Declaração de Conformidades

**19347-1/2022.1:** Os resultados das análises realizadas na amostra atendem aos padrões especificados na Portaria GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021 (Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n° 5, de 28 de setembro de 2017).



## Relatório de Ensaios LIMNOS Nº 19347/2022.1.C

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório 19347/2022.0

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

### Legenda

Ensaio no escopo da acreditação deste laboratório na norma NBR ISO/IEC 17025, pelo Cgcre sob número CRL 0462. Os resultados dos ensaios não acreditados sairão em tabelas separadas.

**GM N°888/2021:** Portaria GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021 (Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n° 5, de 28 de setembro de 2017)..

**LQ:** Limite de Quantificação.

### Observações

Os métodos neste(s) ensaio(s) apresentam-se conformes em relação ao método referenciado. Caso algum ensaio tenha apresentado desvios, adições ou exclusões, estes estarão listados nas observações.

Motivo da Revisão: Revisão de análise.

### Reprodução do Relatório

Este relatório somente poderá ser reproduzido em sua totalidade. Reprodução de partes requer aprovação. A Limnos se isenta de qualquer responsabilidade pela reprodução parcial do mesmo.

### Incertezas

A estimativa da incerteza de medição é conhecida e encaminhada se solicitado.

### Abrangência

Análises validadas por manutenção dos padrões dentro dos desvios de leitura aceitável.

Os resultados têm significado restrito e aplicam-se somente às amostras conforme recebidas.

### Informações de Coleta

Amostragem realizada pelo cliente.

A descrição do material ensaiado, informações de campo e definição dos pontos de amostragem são de inteira responsabilidade do cliente. A Limnos não mantém amostra sob custódia após a liberação dos resultados.

Vespasiano, 6 de julho de 2022

Responsável pela Publicação

Geovana Assunção

Responsável Técnico

Anete dos Santos Moreira  
CRQ - 02103292  
Gerente Técnica

Documento verificado e aprovado por meios eletrônicos

**Chave de Validação:** 82319eebc71e4406960cbba08d77d094



## Relatório de Ensaio LIMNOS Nº 19347/2022.1.C

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório 19347/2022.0

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

**Os resultados relatados abaixo não fazem parte do escopo de acreditação ou reconhecimento deste Laboratório.**

### Resultados Analíticos

<b>Amostra</b>	Água potável usada em teste de Inocuidade - material adsorvente de ânions com granulometria de 100 mesh	<b>Nº Amostra</b>	19347-1/2022.1	<b>Coleta em</b>	22/04/2022 00:00
<b>Matriz</b>	Água Potável			<b>Recepção</b>	22/04/2022 16:30

Análise	Resultado	Unidade do Resultado	GM N°888/2021	Unidade da Legislação	LQ	Referência	Data Análise
1,1 - Dicloroetano (1,1 - Dicloroetileno)	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
1,2 - Diclorobenzeno	< 0,002	mg/L	Máx. 0,001	mg/L	0,002	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
1,2 - Dicloroetano	< 2	µg/L	Máx. 5	µg/L	2	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
1,2 - Dicloroetano (cis + trans)	< 2	µg/L	-	-	2	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
1,4 - Diclorobenzeno	< 0,002	mg/L	Máx. 0,0003	mg/L	0,002	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
2 - Clorofenol (Monoclorofenol)	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
2 - Cloronaftaleno	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
2 - Metilnaftaleno	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
2 - Nitroanilina	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
2 - Nitrofenol	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
2,3,4,6-Tetraclorofenol & 2,3,4,5-Tetraclorofenol	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
2,4 - D + 2,4,5 - T	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 557	16/05/2022
2,4 - Diclorofenol	< 0,05	µg/L	Máx. 0,2	mg/L	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
2,4 - Dimetilfenol	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
2,4 - Dinitrofenol	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
2,4 - Dinitrotolueno	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
2,4,5 - Triclorofenol	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
2,4,6 - Triclorofenol	< 0,00005	mg/L	Máx. 0,2	mg/L	0,00005	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
2,6 - Dinitrotolueno	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
3 - Nitroanilina	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
3,4 - Diclorofenol	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022



**Relatório de Ensaios LIMNOS N° 19347/2022.1.C**

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório 19347/2022.0

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

Análise	Resultado	Unidade do Resultado	GM N°888/2021	Unidade da Legislação	LQ	Referência	Data Análise
4 - Bromodifenil eter	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
4 - Cloro - 3 - Metilfenol	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
4 - Cloroanilina	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
4 - Clorodifenil eter	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
4 - Nitroanilina	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
4,4' - DDT + 4'4 - DDD (DDD Isômeros) + 4'4 - DDE (DDE Isômeros)	< 0,002	µg/L	Máx. 1	µg/L	0,002	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
4,4 - Metoxicloro (Metoxicloro)	< 0,03	µg/L	-	-	0,03	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Acenafteno	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Acenaftileno	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Ácidos Haloacéticos Total	< 0,04	mg/L	Máx. 0,08	mg/L	0,04	EPA - 557	16/05/2022
Acrilamida	< 0,4	µg/L	Máx. 0,5	µg/L	0,4	EPA - 538	16/05/2022
Alacloro	< 0,05	µg/L	Máx. 20	µg/L	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Álcool Benzílico	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Aldicarbe + Aldicarbesulfona + Aldicarbesulfóxido	< 0,06	µg/L	Máx. 10	µg/L	0,06	EPA - 538	16/05/2022
Aldrin	< 0,001	µg/L	-	-	0,001	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Aldrin + Dieldrin	< 0,002	µg/L	Máx. 0,03	µg/L	0,002	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Anilina	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Antimônio Total	< 0,005	mg/L	Máx. 0,006	mg/L	0,005	SMEWW 23ª Edição - Método - 3120B	18/05/2022
Antraceno	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Atrazina	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Azobenzeno	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Benzeno	< 1	µg/L	Máx. 5	µg/L	1	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
Benzil - Butil - Ftalato	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Benzo (a) antraceno	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Benzo (a) pireno	< 1	µg/L	Máx. 0,4	µg/L	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022



## Relatório de Ensaios LIMNOS N° 19347/2022.1.C

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório 19347/2022.0

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

Análise	Resultado	Unidade do Resultado	GM N°888/2021	Unidade da Legislação	LQ	Referência	Data Análise
Benzo (a) pireno	< 0,013	µg/L	Máx. 0,4	µg/L	0,013	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Benzo (b) fluoranteno	< 0,01	µg/L	-	-	0,01	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Benzo (g,h,i) perileno	< 0,01	µg/L	-	-	0,01	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Benzo (k) fluoranteno	< 0,01	µg/L	-	-	0,01	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Berílio Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ª Edição - Método - 3120B	18/05/2022
Bis (2 - Cloroetil) éter	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Bis (2 - Cloroetoxi) metano	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Bis (2 - Etilhexil) ftalato - (Dietilexil ftalato)	< 3	µg/L	Máx. 8	µg/L	3	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Bismuto Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ª Edição - Método - 3120B	18/05/2022
Bromato	< 0,01	mg/L	Máx. 0,01	mg/L	0,01	SMEWW 23ª Edição - Método 4110 - B	16/05/2022
Carbazol	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Carbendazim + Benomil	< 0,48	µg/L	-	-	0,48	EPA - 538	16/05/2022
Carbofuran	< 0,06	µg/L	Máx. 7	µg/L	0,06	EPA - 538	16/05/2022
Clordano (Isômeros)	< 0,002	µg/L	-	-	0,002	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Cloreto de Vinila	< 1,7	µg/L	Máx. 0,5	µg/L	1,7	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
Clorito	< 0,10	mg/L	Máx. 0,7	mg/L	0,10	SMEWW 23ª Edição - Método 4110 - B	16/05/2022
Clorobenzeno (Monoclorobenzeno)	< 0,002	mg/L	Máx. 0,02	mg/L	0,002	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
Clorotalonil	< 0,05	µg/L	Máx. 45	µg/L	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Clorpirifós + Clorpirifós - oxon	< 0,06	µg/L	Máx. 30	µg/L	0,06	EPA - 538	16/05/2022
Criseno	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Diazinon	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Dibenzo (a,h) antraceno	< 0,01	µg/L	-	-	0,01	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Dibenzofurano	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Dibutilftalato	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Diclorometano (Cloreto de Metileno)	< 6	µg/L	Máx. 20	µg/L	6	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022



## Relatório de Ensaios LIMNOS N° 19347/2022.1.C

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório 19347/2022.0

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

Análise	Resultado	Unidade do Resultado	GM N°888/2021	Unidade da Legislação	LQ	Referência	Data Análise
Dieldrin	< 0,002	µg/L	-	-	0,002	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Dietilftalato	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Dimetilftalato	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Disulfoton	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Diuron (Karmex)	< 0,6	µg/L	Máx. 20	µg/L	0,6	EPA - 538	16/05/2022
Dodecacloro Pentaciclodecano (Mirex)	< 0,001	µg/L	-	-	0,001	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Endosulfan (Endosulfan I + Endosulfan II + Endosulfan sulfato)	< 0,055	µg/L	-	-	0,055	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Endrin	< 0,002	µg/L	-	-	0,002	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Estireno	< 2	µg/L	-	-	2	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
Estrôncio Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ª Edição - Método - 3120B	18/05/2022
Ethion	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Etilbenzeno	< 0,002	mg/L	Máx. 300	µg/L	0,002	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
Fenantreno	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Fenol	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Fluoranteno	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Fluoreno	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Glifosato + AMPA	< 50,00	µg/L	Máx. 500	µg/L	50,00	SMEWW 23ª Edição - Método 4110 - B	16/05/2022
Heptacloro	< 0,005	µg/L	-	-	0,005	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Heptacloro Epóxido	< 0,008	µg/L	-	-	0,008	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Heptacloro Epóxido + Heptacloro	< 0,008	µg/L	-	-	0,008	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Heptacloroepóxido Isomero A	< 0,008	µg/L	-	-	0,008	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Heptacloroepóxido Isomero B	< 0,005	µg/L	-	-	0,005	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Hexacloro - 1,3 - Butadieno	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Hexaclorobenzeno	< 0,005	µg/L	-	-	0,005	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022

**Relatório de Ensaios LIMNOS N° 19347/2022.1.C**

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório 19347/2022.0

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

Análise	Resultado	Unidade do Resultado	GM N°888/2021	Unidade da Legislação	LQ	Referência	Data Análise
Hexacloroetano	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
HPA Total	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Indeno (1,2,3-cd) pireno	< 0,01	µg/L	-	-	0,01	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Isoforona	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Ítrio Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ªEdição - Método - 3120B	18/05/2022
Lítio Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ªEdição - Método - 3120B	18/05/2022
m, p - Cresol	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Malation	< 0,05	µg/L	Máx. 60	µg/L	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Mancozebe	< 15	µg/L	-	-	15	EPA - 538	16/05/2022
Metamidofós (Monitor)	< 0,06	µg/L	-	-	0,06	EPA - 538	16/05/2022
Metolacoloro	< 0,05	µg/L	Máx. 10	µg/L	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Molinato	< 0,05	µg/L	Máx. 6	µg/L	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Naftaleno	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Nitrobenzeno	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
o - Cresol (2 - Metilfenol)	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Paládio Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ªEdição - Método - 3120B	18/05/2022
Paration	< 0,02	µg/L	-	-	0,02	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Parationa Metílica	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Pendimetalina	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Pentaclorofenol	< 0,05	µg/L	Máx. 9	µg/L	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Permetrina	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Pireno	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Piridina	< 1	µg/L	-	-	1	EPA - 3510C / 8270D	26/05/2022
Platina Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ªEdição - Método - 3120B	18/05/2022
Profenofós	< 0,3	µg/L	Máx. 0,3	µg/L	0,3	EPA - 538	16/05/2022

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

Análise	Resultado	Unidade do Resultado	GM N°888/2021	Unidade da Legislação	LQ	Referência	Data Análise
Propaclor	< 0,05	µg/L	-	-	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Ródio Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ªEdição - Método - 3120B	18/05/2022
Selênio Total	< 0,01	mg/L	Máx. 0,04	mg/L	0,01	SMEWW 23ªEdição - Método - 3030B - 3114B	17/05/2022
Simazina	< 0,05	µg/L	Máx. 2	µg/L	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Tálio Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ªEdição - Método - 3120B	18/05/2022
Tebuconazol	< 0,06	µg/L	Máx. 180	µg/L	0,06	EPA - 538	16/05/2022
Telúrio Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ªEdição - Método - 3120B	18/05/2022
Terbufós	< 0,5	µg/L	Máx. 1,2	µg/L	0,5	EPA - 538	16/05/2022
Tetracloroeto de Carbono	< 0,8	µg/L	Máx. 4	µg/L	0,8	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
Tetracloroeteno (Tetracloroetileno)	< 2	µg/L	Máx. 40	µg/L	2	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
Titânio Total	< 0,010	mg/L	-	-	0,010	SMEWW 23ªEdição - Método - 3120B	18/05/2022
Tolueno	< 0,001	mg/L	Máx. 30	µg/L	0,001	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
Triclorobenzenos (1,2,3 - TCB + 1,2,4 - TCB + 1,3,5 - TCB)	< 2	µg/L	-	-	2	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
Tricloroeteno (Tricloroetileno)	< 2	µg/L	Máx. 4	µg/L	2	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
Trifluralina	< 0,05	µg/L	Máx. 20	µg/L	0,05	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
Trihalometanos	< 0,004	mg/L	Máx. 0,1	mg/L	0,004	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
Urânio Total	< 0,010	mg/L	Máx. 0,03	mg/L	0,010	SMEWW 23ªEdição - Método - 3120B	18/05/2022
Xilenos (o, m, p)	< 0,002	mg/L	Máx. 500	µg/L	0,002	EPA - 5021A / 8260D	19/05/2022
α - Clordano (cis)	< 0,002	µg/L	-	-	0,002	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
α - HCH	< 0,01	µg/L	-	-	0,01	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
β - HCH	< 0,04	µg/L	-	-	0,04	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
γ - Clordano (trans)	< 0,002	µg/L	Máx. 0,2	µg/L	0,002	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022
γ - HCH / BHC (Lindano)	< 0,002	µg/L	Máx. 2	µg/L	0,002	EPA - 3510C / 8270D	20/05/2022



## Relatório de Ensaio LIMNOS Nº 19347/2022.1.C

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório 19347/2022.0

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

Informações de Campo	
<b>Responsabilidade da Amostragem:</b> Contratante	<b>Coloração da Água:</b> Não se aplica
<b>Plano de Amostragem:</b> -	<b>Observações Gerais:</b> TESTE

Declaração de Conformidades
<b>19347-1/2022.1:</b> Os resultados das análises realizadas na amostra atendem aos padrões especificados na Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017).

**Relatório de Ensaios LIMNOS Nº 19347/2022.1.C**

Este relatório de ensaio cancela e substitui o relatório 19347/2022.0

<b>Cliente:</b> Fundação Gorceix	<b>Telefone:</b> (31) 3559-7410
<b>Endereço:</b> Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57 - Vila Itacolomy - Ouro Preto - Minas Gerais - CEP: 35.400-000 - Brazil	<b>Contato:</b> JORGE EDUARDO GARCIA FERREIRA JUNIOR

**Legenda**

LQ: Limite de Quantificação.

**Observações**

Os métodos neste(s) ensaio(s) apresentam-se conformes em relação ao método referenciado. Caso algum ensaio tenha apresentado desvios, adições ou exclusões, estes estarão listados nas observações.

Motivo da Revisão: Revisão de análise.

**Reprodução do Relatório**

Este relatório somente poderá ser reproduzido em sua totalidade. Reprodução de partes requer aprovação. A Limnos se isenta de qualquer responsabilidade pela reprodução parcial do mesmo.

**Incertezas**

A estimativa da incerteza de medição é conhecida e encaminhada se solicitado.

**Abrangência**

Análises validadas por manutenção dos padrões dentro dos desvios de leitura aceitável.

Os resultados têm significado restrito e aplicam-se somente às amostras conforme recebidas.

**Informações de Coleta**

Amostragem realizada pelo cliente.

A descrição do material ensaiado, informações de campo e definição dos pontos de amostragem são de inteira responsabilidade do cliente.

A Limnos não mantém amostra sob custódia após a liberação dos resultados.

**Vespasiano, 6 de julho de 2022**

Responsável pela Publicação



Geovana Assunção

Responsável Técnico

Anete dos Santos Moreira  
CRQ - 02103292  
Gerente Técnica**Documento verificado e aprovado por meios eletrônicos****Chave de Validação:** 82319eebc71e4406960cbba08d77d094



## ANEXO II

## CARTA DE INTERESSE DA PREFEITURA DE OURO PRETO, MG

28/06/2022 16:19

93eac70b-9fbb-4ec5-a7f8-09fab3ed25fd\_mdt\_1272414 - Documentos Google

**Secretaria Municipal De Meio Ambiente**  
Praça Américo Lopes, 109  
Ouro Preto - Minas Gerais 35400-000  
(31)3559-3253

**OURO  
PRETO**

www.ouropreto.mg.gov.br

PREFEITURA DE OURO PRETO

## Carta de Interesse

A Prefeitura de Ouro Preto, por meio da Secretaria de Meio Ambiente, representada pelo secretário Francisco de Assis Gonzaga, manifesta apoio ao projeto denominado ARSENOUT do Grupo de Físico-Química Orgânica (GFQO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). O projeto coordenado pelo Prof. Dr. Leandro Vinícius Alves Gurgel tem como objetivo a aplicação das tecnologias desenvolvidas pelo grupo de pesquisa em sistemas alternativos para o tratamento fontes alternativas como as águas subterrâneas. Formaliza-se uma parceria entre esta secretaria e o grupo de pesquisa da UFOP visando a transferência das tecnologias desenvolvidas na universidade para a sociedade.

Ouro Preto, 28 de junho de 2022.

Francisco de Assis G. Silva  
(Chapim de Assis)  
Secretário M. Meio Ambiente  
Mat - 44458

**Francisco de Assis Gonzaga da Silva****Secretário de Meio Ambiente****Prefeitura Municipal de Ouro Preto**