



I-0939 - SISTEMA BIOADSORVENTE DE BAIXO CUSTO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA DE CONSUMO HUMANO CONTAMINADA COM ARSÊNIO: PROTOTIPAGEM E AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Jorge Eduardo Garcia Ferreira Junior⁽¹⁾

Engenheiro de Produção pela Faculdade de Tecnologia (FAT) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e Técnico em Meio Ambiente pelo Instituto Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro (IFRJ). Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (ProAmb) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Luisa Cardoso Maia⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Mestra e Doutora em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (ProAmb) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Liliane Catone Soares⁽¹⁾

Bacharel em Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Química Inorgânica e Doutora em Química Analítica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professora do Departamento de Química da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), atuando na área de Química de Solos e Adsorção com ênfase no uso de biomassa para remoção de contaminantes de águas e efluentes.

Leandro Vinícius Alves Gurgel⁽¹⁾

Bacharel em Química Industrial pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (ProAmb) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Doutor em Ciências (Físico-Química) pela Universidade de São Paulo (USP). Professor associado II da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), trabalhando nas áreas de adsorção de metais tóxicos e corantes industriais e produção de bioetanol a partir de biorresíduos.

Endereço⁽¹⁾: Grupo de Físico-Química Orgânica (GFQO), Departamento de Química, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Campus Morro do Cruzeiro, s/nº – Bauxita – Ouro Preto – MG – CEP: 35400-000 – Brasil – e-mail: jorge.junior@ufop.edu.br

RESUMO

O arsênio é um elemento tóxico presente em fontes de água que pode ser removido pelo bioadsorvente de ânions (SBAA), preparado a partir do bagaço de cana-de-açúcar. O SBAA foi empregado em um protótipo para o tratamento de água subterrânea contaminada por arsênio, utilizada como fonte alternativa de abastecimento pela população de Ouro Preto, Minas Gerais. Os testes realizados com o protótipo acoplado em filtros residenciais mostraram que o SBAA obteve até 95 ± 3 % de remoção de arsênio, alcançando teores de arsênio abaixo do limite de $10 \mu\text{g L}^{-1}$, definido pela OMS (Organização Mundial da Saúde) para potabilidade de água. A validação possibilitou classificar a tecnologia no TRL (Nível de Maturidade Tecnológica) 4. O bioadsorvente obteve a certificação de inocuidade do padrão NSF/ANSI 61 de 2016, sendo uma opção de base renovável para remoção de arsênio de água natural. A comparação do desempenho do SBAA com produtos comerciais demonstrou o seu potencial de competir com outras tecnologias no mercado. A análise econômico-financeira do modelo de negócio inicial com venda total de 180.000 unidades dos dispositivos acopláveis aos filtros residenciais, considerando o processo semi-industrial, o alcance de 4 % do mercado da América Latina em 5,0 anos e a precificação calculada em R\$ 35,57 para o conjunto de dispositivos D1 e D2, obteve valor presente líquido de R\$ 269.654,59, 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. Ressalta-se a importância da integração entre os aspectos técnicos e de mercado para o desenvolvimento de tecnologias competitivas.

PALAVRAS-CHAVE: Arsênio, bioadsorvente, prototipagem, análise econômico-financeira.



INTRODUÇÃO

A contaminação das águas naturais por arsênio é um problema de saúde pública mundial que afeta pelo menos 200 milhões de pessoas em mais de 100 países ao redor do mundo (BUNDSCHUH *et al.*, 2022). Na América Latina, a contaminação de água por arsênio afeta 14 milhões de pessoas em 70 % dos países da região (KUMAR *et al.*, 2019; TEIXEIRA *et al.*, 2020). 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).

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 (BUNDSCHUH *et al.*, 2022). Na Holanda, por exemplo, é possível encontrar sistemas que trabalham para alcançar uma concentração final de $1 \mu\text{g L}^{-1}$, mais restrita que o limite de $10 \mu\text{g L}^{-1}$, estabelecido pela OMS para água de consumo humano (WHO, 2001; AHMAD *et al.*, 2020). Por outro lado, os países em desenvolvimento vivem outra realidade, em muitos casos, o consumo de água contaminada com arsênio mostra-se a única opção.

A aplicação de adsorventes como etapa de polimento em sistemas de tratamento de água tem se mostrado efetiva nos casos em que os elementos tóxicos se encontram diluídos (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, à simplicidade de operação, ao potencial de regeneração dos materiais e à baixa geração de lodo tóxico (ASERE; STEVENS; DU LAING, 2019; FU; WANG, 2011).

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 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 contaminada com arsênio (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 com elevada capacidade de adsorção e seletividade (XU *et al.*, 2016).

A cidade de Ouro Preto foi escolhida por apresentar parte de sua população como usuária de fontes alternativas de água contaminadas com teores de arsênio de $20\text{-}40 \mu\text{g L}^{-1}$, 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).

O trabalho buscou o desenvolvimento de um protótipo para a integração da tecnologia SBAA com um sistema de filtração largamente utilizado no Brasil para remoção de arsênio de água subterrânea. Além disso, a análise da viabilidade econômico-financeira buscou apresentar o potencial de comercialização da solução desenvolvida, aumentando a atratividade da tecnologia para o mercado.

MATERIAIS E MÉTODOS

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 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).

A água natural contaminada foi obtida em Ouro Preto, Minas Gerais, coordenadas 20° 23' 07" S, 43° 29' 40" O; 20° 23' 08" S, 43° 29' 52" O; 20° 23' 09" S, 43° 29' 12" O; 20° 23' 11" S, 43° 29' 52" O. Foram coletadas quatro amostras de água subterrânea em locais onde a população utiliza essas fontes alternativas de abastecimento, tais como os bairros Antônio Dias, Alto da Cruz e Piedade. Os experimentos de adsorção de arsênio com água subterrânea foram realizados em batelada para avaliar o desempenho de remoção do contaminante e a cinética de adsorção do bioadsorvente. O desempenho do SBAA foi comparado com os materiais concorrentes encontrados no mercado.

A quantificação de arsênio nas amostras foi realizada por espectrometria de emissão óptica (ICP-OES). Além disso, foi utilizado um cromatógrafo de íons para quantificação dos ânions cloreto, sulfato e nitrato. A capacidade de remoção de arsênio (R) foi determinada pela comparação entre a concentração de inicial e a concentração final das amostras. A capacidade de adsorção de arsênio no equilíbrio (q_e) foi determinada pela quantidade de adsorvato removida por grama de material utilizado no estudo.

Foi realizada uma pesquisa para verificar qual sistema de filtração é mais utilizado na região de Ouro Preto, MG. Após a pesquisa, foram desenvolvidos protótipos com o SBAA para ser acoplado no filtro de barro. Foram realizados testes com os protótipos para avaliação do funcionamento do dispositivo adsorvente com água subterrânea. Buscou-se a certificação do SBAA 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 mercado total (TAM) e o mercado alcançável (SAM) foram definidos com base nos relatos da literatura. O mercado acessível (SOM) foi determinado pelo número de pessoas que a planta piloto do grupo de pesquisa GFQO (Grupo de Físico-Química Orgânica) é capaz de alcançar após cinco anos de operação. A produção máxima foi definida com base na quantidade de bioadsorvente produzido com carregamento de 70 % do volume total do reator de aço utilizado na produção do SBAA. Foram definidos os custos necessários para a manutenção do modelo de negócio e o investimento em bens de capital necessário para a montagem da planta piloto.

O cálculo do imposto a ser recolhido foi realizado com base no Simples Nacional (BRASIL, 2006). A precificação do protótipo foi realizada pelo índice multiplicador *markup*. O fluxo de caixa foi elaborado considerando a estrutura de custos estimada. O Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *payback* foram calculados com base na geração de caixa (lucro ou prejuízo) para avaliação da atratividade do modelo de negócio.

RESULTADOS

Os testes realizados em laboratório com amostras monocomponente de As(V) resultaram em um valor de capacidade de adsorção máxima de As(V) de 27,3 mg g⁻¹. O desempenho da operação de dessorção alcançou resultados de 95,5 % a 99,6 %. A água subterrânea utilizada nos estudos com SBAA apresentou concentração de arsênio variando entre 36,5 ± 0,7 µg L⁻¹ e 39 ± 4 µg L⁻¹ (pH 6,96). A Tabela 1 mostra a concentração de equilíbrio (C_e), a capacidade de adsorção no equilíbrio (q_e) e a capacidade de remoção (R) obtidas para cada um dos materiais testados.

Tabela 1: Estudo de adsorção de arsênio em materiais comerciais e SBAA em batelada.

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

Fonte: Autoria própria (2022).

Os testes realizados com amostras monocomponentes em batelada permitiram a validação das características e funções críticas do bioadsorvente. O desempenho do SBAA, em termos de remoção de arsênio, foi ligeiramente inferior à alumina ativada, conferindo ao bioadsorvente uma capacidade de adsorção de arsênio adequada para comercialização. Quando comparado com o quartzo e o carvão ativado, a capacidade de remoção de arsênio do SBAA foi superior em 205 % e 330 %, respectivamente.

O estudo cinético considerou o tempo de agitação 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 (Tabela 2).

Tabela 2: Parâmetros da cinética de adsorção de arsênio em SBAA com amostra de água natural.

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

Fonte: Autoria própria (2022).

O equilíbrio cinético do sistema foi alcançado em até 30 min, o que mostra o potencial de aplicação do SBAA em sistemas de adsorção em fluxo para tratamento de água contaminada com arsênio. Verificou-se que o SBAA é um material inócuo à saúde humana. Obteve-se o certificado de inocuidade da NSF/ANSI 61 de 2016: *Drinking Water System Components - Health Effects*.

De acordo com os resultados da pesquisa realizada, o filtro de barro é o sistema de filtração mais utilizado na região de Ouro Preto, MG (Figura 1).

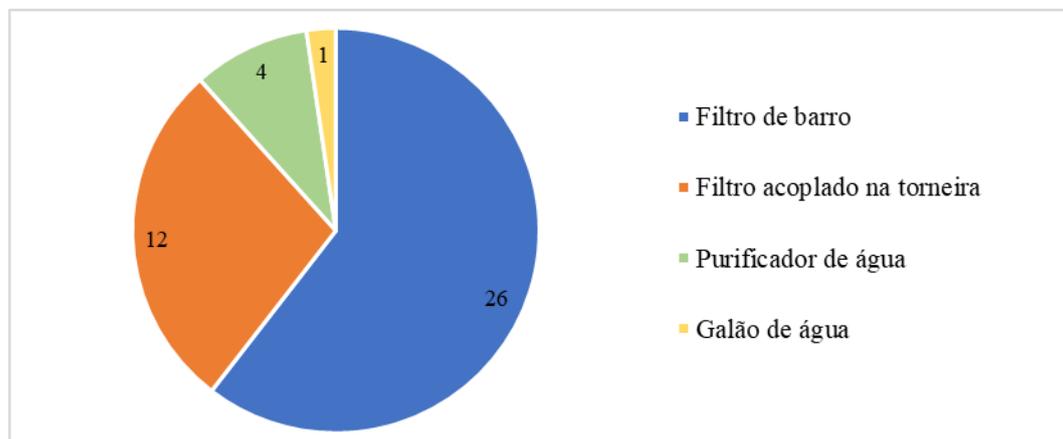


Figura 1: Respostas à pesquisa sobre os sistemas de filtração utilizados em Ouro Preto.

Visando a aplicação do SBAA 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).

A concentração de arsênio da água subterrânea utilizada no ensaio foi de $38 \pm 1 \mu\text{g L}^{-1}$. O filtro com o dispositivo adsorvente D1 (Figura 2) apresentou 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.



Figura 2: Dispositivo D1 acoplável ao filtro de barro.

A partir da análise dos ânions presentes na água natural, identificaram-se os interferentes na operação de adsorção de arsênio pelo dispositivo D1 (Figura 3).

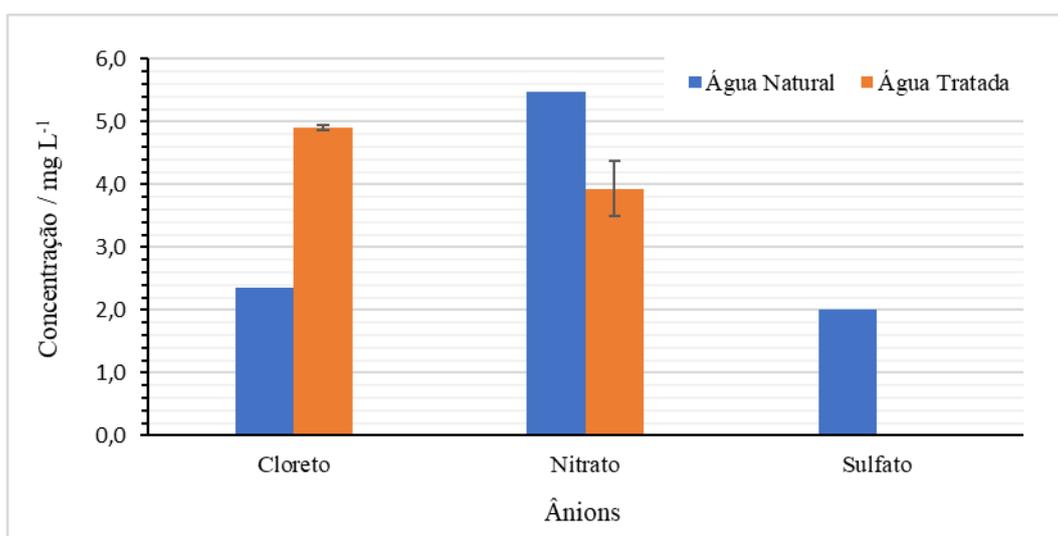


Figura 3: Gráfico da concentração de ânions na água natural e tratada pelo dispositivo D1.

Os íons nitrito 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. Justifica-se o aumento dos teores 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. Dessa forma, mostrou-se necessário o uso de um segundo dispositivo para remoção de arsênio

após a remoção dos ânions interferentes, visando alcançar o limite de arsênio na água estabelecido pela Portaria GM/MS N° 888 de 2021 e pela OMS.

Foram sugeridas duas opções complementares ao dispositivo D1: *i*) uma coluna com o material adsorvente (dispositivo D2) e *ii*) três tubos adsorventes (dispositivo D3). A configuração do protótipo visa a remoção dos interferentes pelo dispositivo D1 (Figura 2), seguida da remoção de arsênio da água pelo dispositivo complementar D2 (Figura 4) ou D3 (Figura 5).



Figura 4: Dispositivo complementar D2.



Figura 5: Dispositivo complementar D3.

Os testes com os dispositivos complementares D2 ou D3, em conjunto com o dispositivo D1, promoveram uma melhoria significativa da qualidade da água tratada, alcançando teores 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 proporcionou $95 \pm 3 \%$ de remoção. Dessa forma, a concentração de arsênio na água alcançou o padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria GM/MS N° 888 de 2021 e pela OMS (WHO, 2001; MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021).

Os testes realizados em laboratório permitiram a identificação de desafios relacionados à prototipagem, tais como o modo de fixação, tamanho do dispositivo e a compactação do material no leito. Os principais desafios relacionados ao uso comercial dos bioadsorventes e abordados pelo trabalho são: a presença de espécies químicas nas águas naturais, tais como fosfato, sulfato e nitrato, que competem pelos sítios ativos do adsorvente, e o aumento de escala de produção.

Após o término de sua vida útil, os adsorventes saturados podem ser empregados para redução dos custos da produção de cerâmica e aumento do desempenho mecânico do cimento (VERBINNEN *et al.*, 2015; ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

A combinação de dispositivos D1 e D2 foi definida como Produto Mínimo Viável (MVP) para a realização do estudo de viabilidade da comercialização dos dispositivos. O estudo da viabilidade 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. Busca-se verificar a atratividade do retorno potencial, em cinco anos (médio prazo), do investimento necessário para o funcionamento de uma empresa 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 3](#).

Tabela 3: 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 SBAA 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 h 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 (BUNDSCHUH et al., 2022).
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 (KUMAR et al., 2019).
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” (Secretaria Nacional da Família, 2021).

Fonte: Autoria própria (2022).

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 ([Tabela 4](#)).

Tabela 4: Fluxo de caixa esperado para o modelo de negócio.

Descrição	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5
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
Simples 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 (2021).

A produção esperada ao longo dos cinco anos de operação pode alcançar 4 % do mercado da América Latina, 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 (Tabela 5). 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 5: 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
Payback / ano	2,38	3,01	3,41
Payback 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).

Os cenários “esperado” e “otimista” apresentaram TIR superiores à TMA, indicando uma expectativa de retorno satisfatória para os investidores. Os indicadores financeiros 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.

O gráfico apresentado na Figura 6 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.

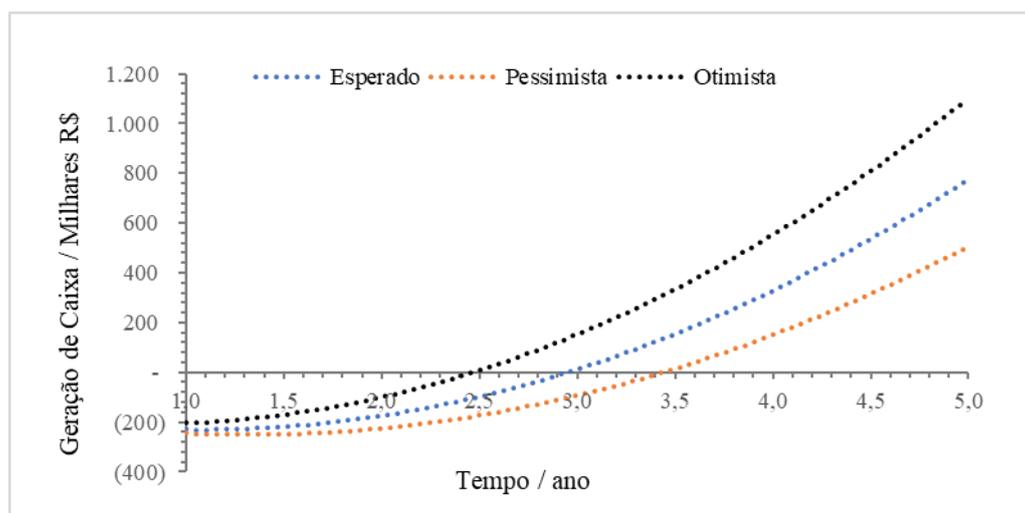


Figura 6: Gráfico da geração de caixa do modelo de negócio.

O gráfico representado na Figura 7 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.

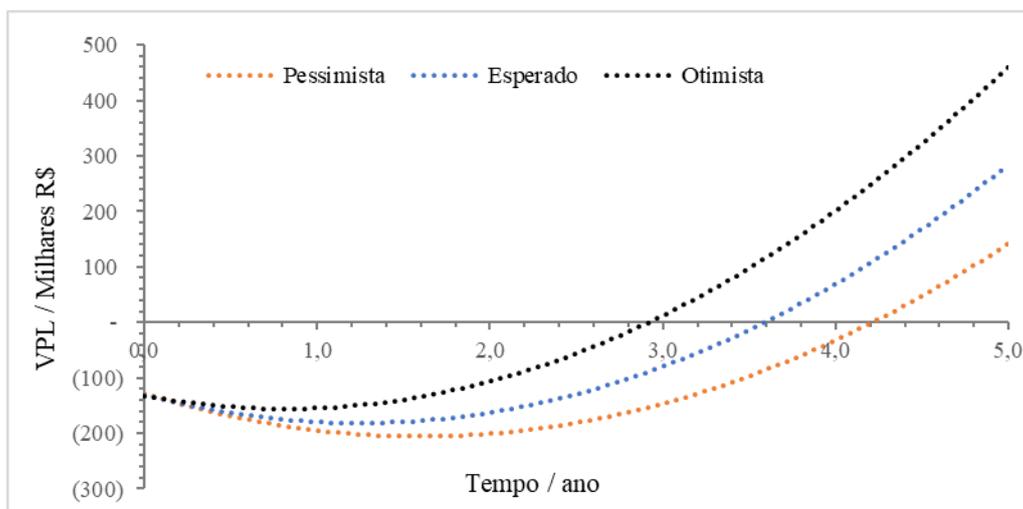


Figura 7: Gráfico do Valor Presente líquido (VPL) do modelo de negócio.

O ponto de equilíbrio mostra o momento em que a empresa deixa de gerar prejuízo e passa a reportar lucro no fluxo de caixa. O ponto de foi alcançado com um ano e oito meses de operação (Figura 8), considerando o cenário esperado.

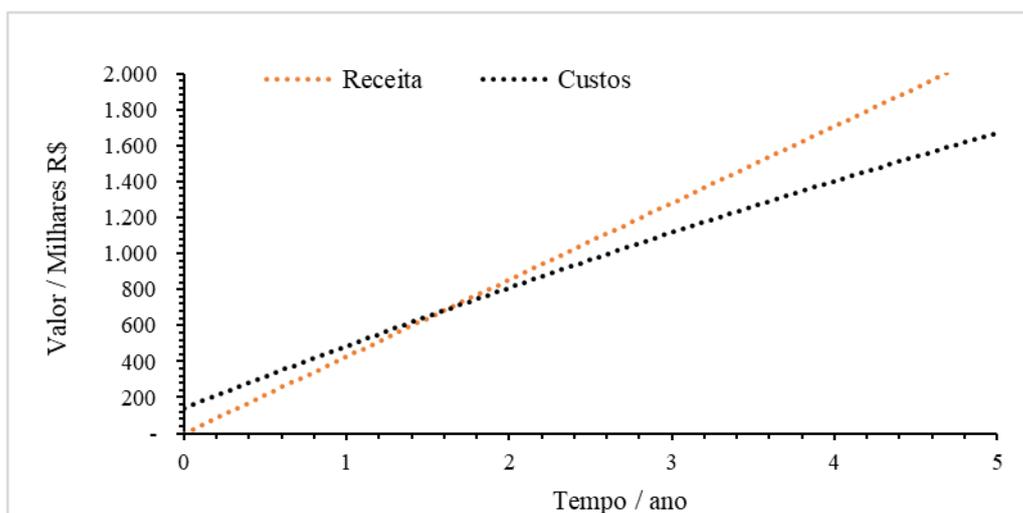


Figura 8: Gráfico da evolução das receitas e custos do modelo de negócio.

Os indicadores (Tabela 5) 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. A conexão de novos adsorventes de base renovável com problemas socioambientais encontrados em regiões específicas contribui para o desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras.

CONCLUSÕES

A ausência dos bioadsorventes no mercado sinaliza a necessidade de estudos para avaliação da viabilidade técnica e econômica da aplicação de tais tecnologias. Este trabalho pode guiar grupos de pesquisa desde o início da concepção dos materiais a adotarem estratégias com foco em problemas socioambientais encontrados em regiões específicas. Essa estratégia de desenvolvimento contribuirá para que seja possível, em um futuro breve, contar com bioadsorventes comerciais para o tratamento de água, fomentando a bioeconomia circular.

Os estudos realizados com amostras de água subterrânea contaminadas por arsênio mostraram que o SBAA apresenta elevada capacidade de remoção de arsênio e uma cinética de adsorção favorável para a aplicação do material em modo contínuo. O SBAA mostrou-se capaz de competir no mercado, tendo como diferencial a produção de base renovável. Além disso, o SBAA apresentou uma eficiência de dessorção superior a 95 %, portanto, o SBAA pode ser reutilizado em novos ciclos de adsorção, 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. A validação da tecnologia em um ambiente relevante contribuiu para o alcance da TRL 4 e a formação do MVP. O bioadsorvente obteve o certificado de inocuidade na categoria de meios de processos de filtração, obtido com base no padrão NSF/ANSI 61 de 2016 (NSF, 2016).

O uso do bagaço de cana-de-açúcar para o desenvolvimento de bioadsorventes está alinhado com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável 6, relacionado à água potável, e 12, produção sustentável, presentes na Agenda 2030 das Nações Unidas. Nota-se a importância da integração entre os aspectos técnicos e de mercado para o desenvolvimento de tecnologias competitivas.

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 comprova a atratividade do modelo de negócio proposto. A conexão de novos adsorventes de base renovável com problemas socioambientais encontrados em regiões específicas contribuiu para o desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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>>.
2. AHMAD, A.; VAN DER WENS, P.; BAKEN, K.; DE WAAL, L.; BHATTACHARYA, P.; STUYFZAND, P. Arsenic reduction to <1 µg/L in Dutch drinking water. **Environment International**, v. 134, p. 105253, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105253>>.
3. 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 Cu²⁺, Co²⁺, Ni²⁺, and oxyanions of Cr⁶⁺ 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>>.
4. 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>>.
5. 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>>.
6. ATSDR. **Toxicological profile for arsenic u.s. department of health and human services**, 2007. Disponível em: <<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.pdf>>.

7. 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>>.
8. BRASIL. **Famílias e Filhos no Brasil**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdh/pt-br/navegue-por-temas/observatorionacional-da-familia/fatos-e-numeros>>. Acesso em: 1 ago. 2022.
9. 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.
10. 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>>.
11. 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>>.
12. 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>>.
13. INGRAM, C. **The drinking water book: How to eliminate the most harmful toxins from your water**. 2nd Edition, Toronto, Celestial Arts, 2006, 185 p.
14. 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>>.
15. 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>>.
16. 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.
17. NSF. **Drinking Water System Components - Health Effects. NSF/ANSI 61**. American National Standard (ANSI), 2016.
18. 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>>.
19. 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>>.
20. 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>>.

21. 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>>.
22. 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>>.
23. WHO. **Environmental Health Criteria 224 ARSENIC AND ARSENIC COMPOUNDS (Second Edition)**. p. 1–66, 2001.
24. 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>>.