

Avaliação comparativa das farinhas das cascas de *Citrus aurantifolia* e *Passiflora edulis* como bioadsorventes para a remoção de arsênio da água potável

Walter Manuel Hoyos-Alayo^{1*}, Jorge Luis Leiva-Piedra², José Lázaro Amaro-Mellado³, Emilio Ramirez-Juidias⁴

¹Mestre em Engenharia Ambiental, Universidad Tecnológica del Perú, Perú. (*Autor correspondente: c23712@utp.edu.pe)

²Mestre em Proteção de Cultivos, Universidad Tecnológica del Perú, Perú.

³Doutor em Arquitetura, Universidad de Sevilla, España.

⁴Doutor em Engenharia, Universidad de Sevilla, España.

Histórico do Artigo: Submetido em: 13/09/2025 – Revisado em: 12/12/2025 – Aceito em: 06/01/2026

RESUMO

A contaminação por arsênio na água para consumo humano permanece uma crise persistente em comunidades rurais e periurbanas no Peru, onde as concentrações medidas frequentemente excedem o limite máximo permissível de 0,010 mg/L, aumentando a vulnerabilidade em saúde pública. Este estudo teve como objetivo comparar a eficácia das farinhas de casca de *Citrus aurantifolia* e *Passiflora edulis* como bioadsorventes para remoção de arsênio em água potável. Implementou-se um delineamento fatorial 4×3 (dose e tempo de contato), ajustado por um modelo de metodologia de superfície de resposta (MSR/RSM); a validação analítica foi realizada por ICP-OES e a inferência estatística incluiu ANOVA com modelo fatorial geral complementar. A farinha de *Passiflora edulis* atingiu remoções de até 90,2% sob condições ótimas (3,92 g L⁻¹, 29,1 min), reduzindo a concentração final de arsênio para 0,010 mg/L. Em contraste, a farinha de *Citrus aurantifolia* atingiu remoção máxima de 56,1% em 7,76 g L⁻¹ e 49,1 min. O modelo estatístico explicou mais de 96% da variabilidade e confirmou a importância da dose e o efeito sinérgico do tempo de contato, com ajuste superior para *Passiflora edulis* (R² ajustado = 95,85%). Concluímos que a farinha de casca de *Passiflora edulis* é uma alternativa eficiente, de baixo custo e alinhada à economia circular, viável para contextos com restrições tecnológicas.

Palavras-Chaves: Bioadsorção, Arsênio, Água potável, Delineamento fatorial, Resíduos agroindustriais.

Comparative evaluation of *Citrus aurantifolia* and *Passiflora edulis* peel flours as bioadsorbents for arsenic removal from drinking water

ABSTRACT

Arsenic contamination in drinking water remains a persistent crisis in rural and peri-urban communities in Peru, where measured concentrations frequently exceed the maximum permissible limit of 0.010 mg/L, thereby heightening public-health vulnerability. This study aimed to compare the efficacy of *Citrus aurantifolia* and *Passiflora edulis* peel flours as bioadsorbents for arsenic removal from potable water. A 4×3 factorial design (dose and contact time) was implemented and fitted with a quadratic response surface methodology (RSM) model; analytical validation was performed by ICP-OES, and statistical inference included ANOVA with a complementary general factorial model. The *Passiflora edulis* flour achieved removals of up to 90.2% under optimal conditions (3.92 g L⁻¹, 29.1 min), lowering the final arsenic concentration to 0.010 mg/L. By contrast, the *Citrus aurantifolia* flour reached a maximum removal of 56.1% at 7.76 g L⁻¹ and 49.1 min. The statistical model explained over 96% of the variability and confirmed the importance of dose and the synergistic effect of contact time, with a superior fit for *Passiflora edulis* (adjusted R² = 95.85%). We conclude that *Passiflora edulis* peel flour is an efficient, low-cost, circular-economy-aligned alternative that is viable for settings with technological constraints.

Keywords: Bioadsorption, Arsenic, Drinking water, Factorial design, Agro-industrial residues.

Hoyos-Alayo, W. M., Leiva-Piedra, J. L., Amaro-Mellado, J. L., & Ramirez-Juidias, E. (2026). Avaliação comparativa das farinhas das cascas de *Citrus aurantifolia* e *Passiflora edulis* como bioadsorventes para a remoção de arsênio da água potável. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.14, n.1, p.58-83.



Comparativo del uso de harinas de cáscara de *Citrus aurantifolia* y *Passiflora edulis* como agentes bioadsorbentes de arsénico en agua para consumo humano

RESUMEN

La contaminación por arsénico en el agua potable constituye una crisis persistente en comunidades rurales y periurbanas de Perú, donde los valores detectados superan el límite máximo permisible de 0,010 mg/L, incrementando la vulnerabilidad sanitaria de sus habitantes. Este estudio tuvo como objetivo comparar la eficiencia de harinas de cáscara de *Citrus aurantifolia* y *Passiflora edulis* como bioadsorbentes para la remoción de arsénico en agua destinada al consumo humano. Se empleó un diseño factorial 4×3 (dosis y tiempo), sobre el cual se ajustó un modelo de superficie de respuesta (RSM) cuadrático; la validación analítica se realizó por ICP-OES y el análisis estadístico incluyó ANOVA y un modelo factorial general complementario. Los resultados mostraron que la harina de maracuyá alcanzó remociones de hasta 90,2% con condiciones óptimas de 3,92 g/L y 29,1 min, reduciendo la concentración final de arsénico a 0,010 mg/L. En contraste, la harina de limón obtuvo un máximo de 56,1% con 7,76 g/L y 49,1 min. El modelo estadístico explicó más del 96% de la variabilidad y confirmó la relevancia de la dosis y el efecto sinérgico del tiempo, con un ajuste superior para maracuyá (R^2 ajustado = 95,85%). Se concluye que la harina de maracuyá constituye una alternativa eficiente, de bajo costo y alineada con la economía circular, viable para zonas con limitaciones tecnológicas.

Palabras clave: Bioadsorción, Arsénico, Agua potable, Diseño factorial, Residuos agroindustriales.

1. Introdução

O acesso à água potável segura constitui um direito humano fundamental; no entanto, esse desafio persiste em escala global. Segundo a OMS, em 2024, aproximadamente 2 bilhões de pessoas careciam de acesso a serviços de água potável gerenciados de maneira segura, especialmente em países de baixa e média renda, consumindo água contaminada por metais pesados (Garg et al., 2024); estima-se que 785 milhões de pessoas ainda não tenham acesso a serviços básicos de água potável (Kakinuma & Wada, 2024) e que 7,6 milhões de crianças morram a cada ano devido a contaminantes tóxicos veiculados pela água (Pramanik et al., 2019).

A contaminação por metais pesados representa uma das ameaças mais severas à qualidade dos recursos hídricos, pois elementos como chumbo, cádmio, cromo, níquel e arsênio frequentemente excedem os limites recomendados, impactando a saúde de milhões de pessoas (Mohsin et al., 2025). De acordo com a Organização Mundial da Saúde, cerca de 140 milhões de pessoas em mais de 70 países estão expostas a concentrações de arsênio superiores a 10 µg/L, valor máximo permitido para consumo humano (Sirajudheen et al., 2024). Na América Latina, a situação é particularmente alarmante, tendo sido reportados níveis de arsênio de até 200 µg/L em águas subterrâneas da Argentina, Chile e Peru, o que excede em até 20 vezes os padrões internacionais, afetando comunidades rurais, indígenas e periurbanas (R. Kumar et al., 2019).

No Peru, estudos recentes identificaram valores de arsênio em fontes hídricas da serra que superam 50 µg/L, colocando em risco mais de 500.000 habitantes em regiões como Arequipa, Puno e Tacna (Fano et al., 2020). Por outro lado, no distrito de Mórrope, Lambayeque, a presença de arsênio na água potável constitui um dos principais desafios ambientais e de saúde pública, afetando de forma persistente tanto zonas rurais quanto urbanas. Desde 2018, diversas localidades foram declaradas em estado de emergência devido à detecção de concentrações de arsênio superiores ao limite máximo permível (0,010 mg/L) estabelecido pela norma sanitária peruana (D.S. 031-2010-SA). Análises realizadas entre 2018 e 2022 reportaram valores alarmantes em fontes de abastecimento, com registros entre 0,017 e 0,124 mg/L, destacando-se setores como Las Delicias (0,124 mg/L), Arbolsol (0,058 mg/L) e Carrizal (0,062 mg/L).

Essa situação é agravada pelo vencimento da vida útil de mais de 2.000 filtros intradomiciliares instalados como medida de emergência e pela ineficácia progressiva da estação de tratamento para remoção de arsênio do poço nº 02 em Cruz del Médano, que no último monitoramento (setembro de 2023) registrou concentração de 0,031 mg/L, triplicando o valor permitido. Ademais, a contaminação avançou para novas localidades como Paredones Alto, Lagartera e Positos, afetando mais de 3.100 moradias apenas em áreas rurais,

além de 1.339 moradias na pequena cidade de Cruz del Médano, evidenciando uma crise estrutural de acesso à água segura para milhares de habitantes (Dávila & Flores-Cerna, 2022). Portanto, a necessidade de soluções tecnológicas sustentáveis e da renovação urgente dos sistemas de tratamento é prioritária para garantir o direito humano à água potável em Mórrope.

O arsênio é considerado um dos contaminantes mais tóxicos e persistentes em ambientes aquáticos, estando amplamente distribuído em águas subterrâneas das regiões andinas e do Cone Sul (Murray et al., 2023). A exposição crônica a esse metaloide acarreta riscos severos à saúde, tais como câncer de pele, pulmão e bexiga, doenças cardiovasculares e alterações neurológicas, sendo responsável por mais de 43.000 mortes anuais por câncer (Shaji et al., 2021). Embora tecnologias convencionais como coagulação-floculação, osmose reversa e adsorção com carvão ativado tenham demonstrado eficácia na remoção de arsênio, ainda persistem limitações econômicas e técnicas que dificultam sua implementação em contextos rurais (Tolkou et al., 2020).

Diante disso, a valorização de resíduos agroindustriais como bioadsorventes desponta como alternativa promissora, alinhada aos princípios da economia circular, ao transformar subprodutos agrícolas em soluções sustentáveis para a remediação ambiental (Umare et al., 2024). Nessa linha, a literatura latino-americana reporta experiências exitosas com materiais lignocelulósicos de farinhas de casca de banana e laranja em combinação, alcançando eficiências de remoção de arsênio superiores a 85% (Irem et al., 2017), enquanto resíduos de milho e bagaço de cana atingiram remoções próximas de 90% em ensaios-piloto (Maia et al., 2023).

Nesse contexto, as cascas de *Citrus aurantifolia* (limão) e *Passiflora edulis* (maracujá) se destacam por sua abundância na região de Lambayeque, Peru, e por constituírem uma matriz lignocelulósica rica em pectinas, celulose e hemiceluloses. Esses componentes concentram grupos funcionais, como carboxilas e hidroxilas, que atuam como sítios ativos e favorecem a retenção de espécies arsenicais por mecanismos de adsorção eletrostática, troca iônica e complexação superficial, dependendo do pH e da forma química do arsênio em solução. Em água, o arsênio pode ocorrer como arsenito, em geral neutro, e como arseniato, predominantemente aniônico, o que condiciona o tipo e a intensidade das interações com grupos carboxílicos (COOH/COO⁻) e hidroxílicos (OH), por atração eletrostática e complexação. A fração mineral do material também pode contribuir com sítios adicionais de ligação. Assim, a disponibilidade regional desses resíduos e sua química superficial justificam sua seleção como bioadsorventes para a remoção de arsênio, conforme reportado em estudos prévios (Iliná et al., 2009; Marín-Rangel et al., 2012).

O objetivo desta pesquisa foi comparar de maneira sistemática a eficiência de farinhas de casca de *Citrus aurantifolia* e *Passiflora edulis* como agentes biorremediadores de arsênio em água para consumo humano.

2. Material e Métodos

2.1 Preparação dos agentes biorremediadores

As farinhas de casca de *Citrus aurantifolia* e *Passiflora edulis* foram obtidas a partir de resíduos frescos coletados em mercados de Lambayeque, no norte do Peru. Inicialmente, os resíduos foram lavados com água destilada para remover impurezas superficiais e, posteriormente, secos em estufa (Magic Mill, modelo MFD-6060) a 65 °C por 24 horas; esse processo assegura a conservação de compostos funcionais e reduz a atividade microbiana. Em seguida, o material seco foi moído e peneirado em malha nº 50 (ASTM E-11, 300 µm) para obter partículas homogêneas, otimizando a área específica para a bioadsorção. O rendimento de obtenção das farinhas foi de 16–18% em relação ao peso úmido inicial.

As farinhas foram armazenadas em sacos de polietileno com fechamento hermético tipo Ziploc, em ambiente protegido da luz, cobertos com papel-alumínio, da umidade e sob temperatura controlada (20–25 °C), seguindo a FAO e o Codex Alimentarius CAC/RCP 44-1995, garantindo a preservação das propriedades funcionais e evitando contaminação cruzada.

2.2 Caracterização proximal e funcional das farinhas

Cada amostra foi submetida à análise proximal (carboidratos, proteínas, lipídeos, cinzas, umidade e energia total) conforme o método FAO Food and Nutrition Paper Vol. 14/7. Ademais, a identificação de grupos funcionais responsáveis pela bioadsorção foi realizada por espectroscopia no infravermelho FTIR-ATR (software Perkin Elmer Spectrum 10), segundo a norma ASTM E1252 - Prática padrão para técnicas gerais de obtenção de espectros infravermelhos para análise qualitativa.

2.3 Coleta e caracterização inicial das amostras de água

A amostragem de água foi realizada na localidade de Carrizal, distrito de Mórrope, departamento de Lambayeque, Perú. As amostras foram coletadas em dois recipientes plásticos de 10 L previamente lavados com ácido nítrico a 10% e enxaguados com água desionizada, seguindo a norma internacional ISO 5667-1:2023 para técnicas de amostragem.

Para garantir a qualidade e a representatividade das amostras, estas foram preservadas sob refrigeração (4 °C) e transportadas sob cadeia de custódia para um laboratório acreditado (ISO/IEC 17025:2017). Os parâmetros físico-químicos medidos incluíram pH, temperatura, condutividade e concentração inicial de arsênio total; além disso, cada amostra e tratamento foi codificado, permitindo a rastreabilidade integral durante o processo experimental e analítico.

A seleção de um volume de trabalho de 250 mL para cada ensaio responde à necessidade de simular condições representativas de tratamentos em escala de laboratório e de uso doméstico, possibilitando também a comparação com pesquisas prévias de adsorção em sistemas descontínuos (Ntwampe, 2021).

2.4 Ensaios de remoção de arsênio: delineamento experimental e controle

Empregou-se um delineamento fatorial 4×3 (doses do bioadsorvente: 1, 2, 4 e 8 g/L; tempos de contato: 30, 60 e 90 min) (Tabela 1), sobre o qual foi ajustado um modelo quadrático de metodologia de superfície de resposta (RSM) por mínimos quadrados. Para cada farinha foram executadas 24 corridas em duplicata (n = 2), totalizando 48 corridas; a variável-resposta foi a concentração final de arsênio (mg/L), a partir da qual se derivaram o percentual de remoção e a capacidade de adsorção (q) (mg/g).

Tabela 1 – Delineamento dos tratamentos
Table 1 – Treatment design

Dose da farinha (g/L)	Tempo de contato (min)			
	0	30	60	90
	0	30	60	90
0	Controle	-	-	-
1	-	1; 30	1; 60	1; 90
2	-	2; 30	2; 60	2; 90
4	-	4; 30	4; 60	4; 90
8	-	8; 30	8; 60	8; 90

Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Para cada ensaio, 250 mL de amostra foram colocados em béqueres sob agitação constante de 150 rpm e temperatura controlada de 45 °C (IKA, modelo C-Mag HS 7 control), parâmetros selecionados por sua eficácia reportada em estudos prévios e por sua pertinência para simular ambientes de alta temperatura em

regiões rurais (Hammad et al., 2025). Para a dosagem das farinhas utilizou-se balança analítica (BOECO, modelo BAS 31 PLUS; precisão de 0,001 g) em todas as pesagens.

Ao término do tempo de contato, as amostras foram filtradas em filtros de papel de celulose Whatman nº 1 (11 µm) para separar completamente o bioadsorvente da água. Como controle de qualidade, incluíram-se dois ensaios em branco (um para cada farinha), cada qual com 1 L de água em frascos novos e dedicados, seguindo o mesmo protocolo experimental, porém sem adição de bioadsorvente. Todos os procedimentos foram conduzidos conforme os princípios das Boas Práticas de Laboratório (OECD, 1998).

2.5 Concentração final de arsênio, controle de qualidade e validação analítica

A determinação da concentração final de arsênio total nas amostras tratadas foi realizada após cada um dos tratamentos experimentais, permitindo quantificar a eficiência de remoção em função da dose do bioadsorvente e do tempo de contato. Além disso, as amostras de água, uma vez concluído o processo de adsorção e a subsequente filtração, foram encaminhadas a um laboratório acreditado segundo a norma ISO/IEC 17025:2017 para análise.

A quantificação de arsênio foi efetuada por espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), conforme o método padronizado EPA Method 200.7, Rev 4.4 (2024) para determinação de metais-traço em água e resíduos. Esse procedimento assegura alta sensibilidade analítica, com limites de detecção e de quantificação compatíveis com a normativa internacional (LD: 0,002 mg/L; LQ: 0,008 mg/L). As etapas do ensaio incluíram preservação das amostras, digestão ácida e leitura instrumental, seguindo protocolos validados e sob rigorosos controles internos de qualidade (inclusão de padrões e brancos).

Para validar a eficiência líquida do processo, realizou-se comparação direta entre a concentração de arsênio nas amostras iniciais (antes do tratamento) e nas amostras finais (após a aplicação de cada tratamento com bioadsorvente), determinando-se o percentual de remoção alcançado para cada combinação de dose e tempo. Todos os resultados foram registrados com seu respectivo código de laboratório, data e hora de amostragem, assegurando rastreabilidade e reprodutibilidade do estudo. O laboratório de análises é independente e não possui conflito de interesses com os autores. A capacidade de adsorção foi estimada por meio da Equação 1.

$$q = \frac{C_0 - C_F}{d} \quad (1)$$

Onde: q = capacidade de adsorção (mg/g); C₀ e C_F = concentrações inicial e final de arsênio (mg/L), respectivamente; e d = dose do bioadsorvente (g/L).

2.6 Análise estatística e visualização dos resultados

A análise estatística foi conduzida no Minitab Statistical Software, versão 22.1.0. Os dados experimentais foram submetidos à metodologia de superfície de resposta (RSM) e à análise de variância (ANOVA) para determinar a influência da dose do bioadsorvente e do tempo de contato, bem como suas possíveis interações, sobre a eficiência de remoção de arsênio. A validade e o ajuste dos modelos foram avaliados considerando os coeficientes de determinação ajustado (R²), predito e o teste de falta de ajuste.

Além do ajuste via RSM, aplicou-se um ANOVA fatorial para hierarquizar os efeitos principais (dose, tempo) e sua interação sobre a concentração final de arsênio. Esse procedimento integrou o arcabouço estatístico do estudo para oferecer uma leitura robusta e coerente com a otimização, reforçando a evidência de desempenho relativo entre as farinhas e respaldando a seleção de combinações operacionais mais eficazes dentro do intervalo experimental avaliado.

As condições ótimas para a remoção de arsênio foram identificadas por meio da função de desejabilidade composta. Os resultados experimentais e as respostas preditas pelos modelos foram visualizados por gráficos de superfície de resposta, gráficos de contorno e gráficos de predição múltipla, o que permitiu identificar e validar visualmente as regiões ótimas de operação no espaço experimental considerado.

3. Resultados

3.1 Características físico-químicas da água antes do tratamento

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para os principais parâmetros físico-químicos (pH, condutividade, arsênio e temperatura) das amostras de água coletadas em Carrizal, Mórrope. Observa-se que o pH encontrava-se dentro do limite permissível estabelecido pelo D.S. n° 031-2010-SA, em condições neutras a ligeiramente alcalinas, favoráveis à remoção de metaloides em processos de bioadsorção.

Tabela 2 – Caracterização inicial das amostras de água coletadas em Carrizal, Mórrope, Lambayeque
Table 2 – Initial characterisation of water samples collected in Carrizal, Mórrope, Lambayeque

Parâmetro físico-químico	Unidade	Amostra 1	Amostra 2	Limite máximo permissível
pH	—	7,42	7,74	6,5 – 8,5
Condutividade	µS/cm	1678	1695	1500
Arsênio (As)	mg/L	0,074	0,090	0,010
Temperatura	°C	24,1	24,3	—

Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Entretanto, a condutividade elétrica superava o limite máximo permissível de 1500 µS/cm da normativa peruana, indicando elevada concentração de sais dissolvidos e possíveis aportes minerais na área de estudo. Em relação ao arsênio, as concentrações iniciais excediam o valor máximo permitido tanto pela legislação nacional quanto pelas diretrizes da OMS para água destinada ao consumo humano, evidenciando a gravidade da contaminação e a necessidade urgente de tecnologias de remoção eficazes e acessíveis. Por sua vez, a temperatura manteve-se estável, compatível com as condições ambientais da região durante o período de amostragem.

Cabe destacar que a OMS não estabelece valores de referência baseados em saúde para pH ou condutividade na água de consumo humano, considerando-os parâmetros principalmente operacionais (OMS, 2017). Contudo, a normativa peruana define limites estritos para esses parâmetros no contexto da proteção sanitária (Ministerio de Salud, 2011).

3.2 Caracterização proximal e funcional das farinhas

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise proximal das farinhas de casca de limão (*C. aurantifolia*) e maracujá (*P. edulis*). Observa-se que ambas apresentam elevado teor de carboidratos (> 70%), superior na farinha de limão em relação à de maracujá.

Tabela 3 – Composição proximal das farinhas de casca de *Citrus aurantifolia* e *Passiflora edulis*
Table 3 – Proximate composition of *Citrus aurantifolia* and *Passiflora edulis* peel flours

Parâmetro	Unidade	<i>C. aurantifolia</i>	<i>P. edulis</i>
Carboidratos	%	78,60	72,29

Cinzas	%	7,07	18,25
Lipídeos	%	1,90	1,20
Umidade	%	6,84	5,26
Proteínas	%	5,60	3,00

Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Por outro lado, no teor de cinzas, a farinha de maracujá apresenta valor mais alto (18,25%) em comparação com a de limão (7,07%), o que sugere maior quantidade de compostos minerais e, portanto, mais sítios ativos potenciais para a adsorção de metais (Carrasco et al., 2025). Quanto ao teor de lipídeos, ambas as farinhas apresentam valores baixos (< 2%), com pequenas diferenças. O teor de umidade em ambas é < 7%, fator importante para a estabilidade e o armazenamento do material, enquanto o reduzido teor de gordura limita a interferência nos processos de adsorção (Ivanovska & Kostic, 2022).

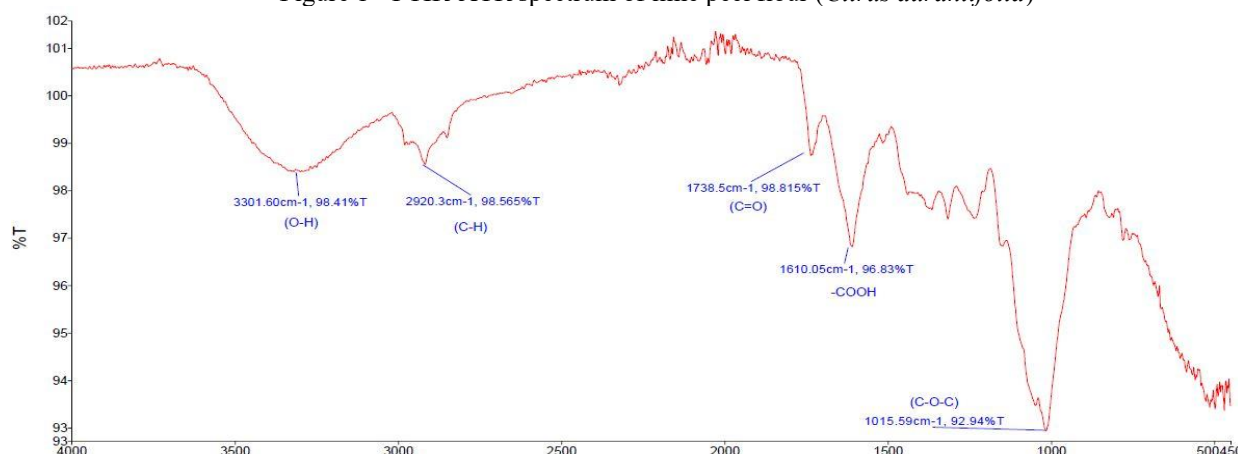
No que diz respeito ao teor de proteínas, a farinha de limão apresenta 5,60%, quase o dobro do observado na de maracujá (3,00%). Embora moderado, os grupos funcionais presentes nas cadeias laterais de aminoácidos, como aminas, carboxilas e tióis, contribuem significativamente para a adsorção de metais pesados por meio da formação de complexos e ligações coordenadas na superfície do bioadsorvente (Ahad et al., 2017).

3.3 Caracterização funcional por espectroscopia FTIR

As Figuras 1 e 2 apresentam os espectros FTIR-ATR das farinhas de casca de limão e maracujá, destacando-se as bandas associadas aos principais grupos funcionais presentes em ambas as matrizes lignocelulósicas. A Tabela 4 mostra a diferenciação dos espectros FTIR-ATR entre as duas farinhas.

Figura 1 – Espectro FTIR-ATR da farinha de casca de limão (*Citrus aurantifolia*)

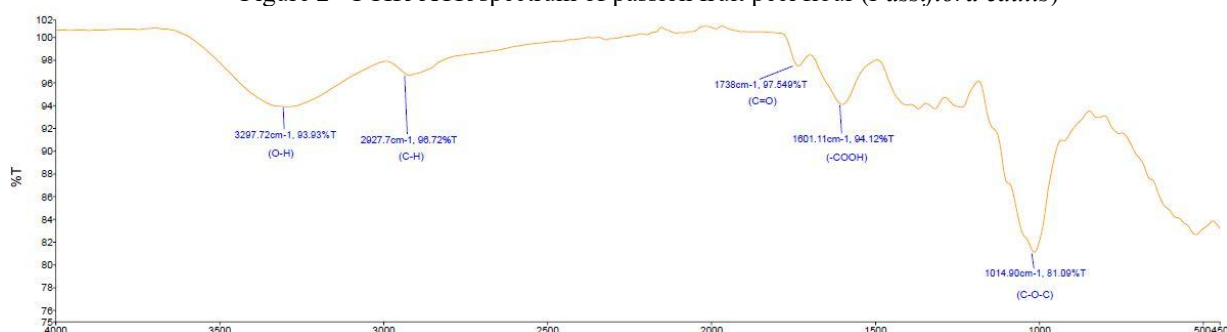
Figure 1 - FTIR-ATR spectrum of lime peel flour (*Citrus aurantifolia*)



Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Figura 2 – Espectro FTIR-ATR da farinha de casca de maracujá (*Passiflora edulis*)
Figure 2 - FTIR-ATR spectrum of passion fruit peel flour (*Passiflora edulis*)



Fonte: Elaboração dos autores
Source: Prepared by the authors

Tabela 4 – Diferenciação dos espectros FTIR-ATR das farinhas de maracujá e limão
Table 4 – FTIR-ATR spectral differentiation between passion fruit and lime peel flours

Grupo (atribuição)	Farinha de <i>C. aurantifolia</i> (cm⁻¹ / %T)	Farinha de <i>P. edulis</i> (cm⁻¹ / %T)	Varição observada	Interpretação
O–H (larga)	3301,6 / 98,41	3297,7 / 93,85	↓ 4 cm ⁻¹ e menor %T (→ maior absorbância)	Pequeno deslocamento para menor energia e banda mais intensa; sugere mais ligações de H e/ou maior participação do –OH (por protonação/desprotonação ou interação com íons/oxianions).
C–H alifático	2920,3 / 98,57	2927,7 / 98,72	+7,4 cm ⁻¹ , intensidade quase igual	Mudanças menores; útil para normalizar intensidades (pico “invariante”).
C=O (carbonila)	1738,5 / 98,82	1738,0 / 97,55	≈ sem deslocamento; mais intenso	Frequência estável (o tipo de carbonila não muda), porém maior participação do C=O (microambiente mais polar ou coordenação fraca).
–COOH (região ~1600)	1610,1 / 96,83	1601,1 / 94,12	↓ 9 cm ⁻¹ e mais intenso	Deslocamento para menor frequência típico de desprotonação (–COO ⁻) e/ou complexação com cátions/metaloídeos, que “amolece” a ligação.
C–O / C–O–C	1015,6 / 92,94	1014,0 / 81,09	≈ sem deslocamento; grande aumento de absorbância	Aumento claro de contribuições C–O (álcool/éster/éter). Pode indicar mais grupos C–O disponíveis ou mudanças conformacionais que ampliam o dipolo efetivo.

Fonte: Elaboração dos autores
Source: Prepared by the authors

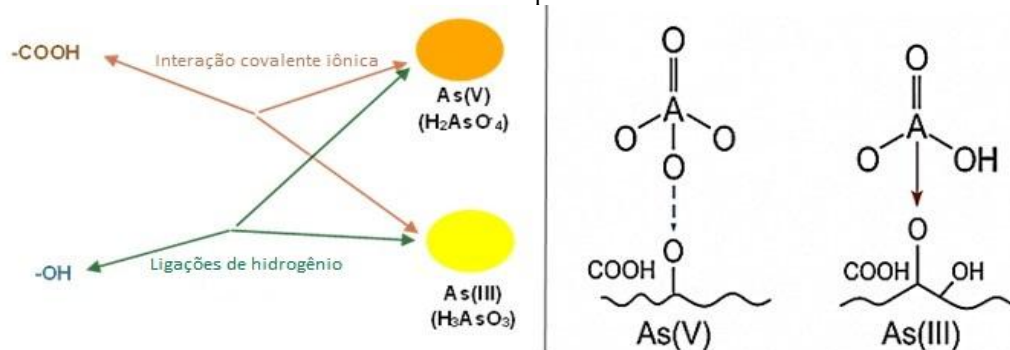
Em ambos os espectros foram identificadas bandas características. Observa-se uma banda larga em torno de 3301 cm⁻¹ no limão e 3297 cm⁻¹ no maracujá, atribuída ao estiramento O–H, comum em celulose, hemicelulose e pectinas. Também se registram bandas entre 2920 cm⁻¹ no limão e 2927 cm⁻¹ no maracujá, relacionadas ao estiramento C–H, associadas à fração de polissacarídeos e compostos alifáticos. Em 1738 cm⁻¹,

ambos os materiais apresentam uma banda intensa atribuída ao estiramento de carbonilas ($C=O$), vinculada a ésteres e grupos acetila presentes em hemiceluloses e pectinas. Além disso, aparecem bandas em 1610 cm^{-1} no limão e 1601 cm^{-1} no maracujá, associadas a grupos carboxílicos ($COOH$), indicando a presença de ácidos urônicos e pectinas. Por fim, bandas em 1015 cm^{-1} no limão e 1014 cm^{-1} no maracujá são atribuídas a vibrações $C-O-C$ de ligações glicosídicas, típicas de celulose e hemicelulose. Do ponto de vista funcional, a presença de grupos hidroxila, carboxila e carbonila em ambas as farinhas é relevante, pois sugere sítios com afinidade por espécies arsenicais por troca iônica e complexação superficial (A. Kumar et al., 2022). As pequenas variações na posição e na intensidade relativa das bandas podem refletir diferenças na composição química e no grau de polimerização de cada matriz.

Na Figura 3, apresenta-se um modelo químico ilustrado, no qual se observa como os grupos funcionais $-COOH$ e $-OH$ presentes na farinha de limão e de maracujá estariam interagindo com o arsênio em seus dois estados comuns em ambientes aquáticos ($As(III) \rightarrow H_3AsO_3$) e ($As(V) \rightarrow H_2AsO_4$); nele também se podem ver as ligações iônicas ou covalentes entre $-COOH$ e as diferentes espécies de arsênio, bem como as possíveis ligações de hidrogênio entre $-OH$ e o arsênio. Por fim, são mostradas as diferenças no modo de interação entre arsenito ($As(III)$) e arseniato ($As(V)$), fator-chave para entender a eficiência de um material em remover metais pesados da água.

Figura 3 – Comportamento dos grupos funcionais presentes nas farinhas de casca de limão e maracujá na bioadsorção de arsênio (As)

Figure 3 - Behaviour of functional groups in lime and passion fruit peel flours during arsenic (As) bioadsorption



Fonte: Elaboração dos autores
Source: Prepared by the authors

Como modelo conceitual, a Figura 3 sintetiza as interações esperadas entre os grupos carboxílicos ($COOH/COO^-$) e hidroxílicos (OH) presentes nas farinhas e as espécies de arsênio em água. O arsenito, em geral neutro (H_3AsO_3), tende a interagir principalmente por ligações de hidrogênio, enquanto o arseniato, predominantemente aniônico ($H_2AsO_4^-$), favorece interações eletrostáticas e complexação com grupos carboxílicos, em função do pH. Esse esquema orienta a interpretação dos resultados de bioadsorção, pois a forma química do arsênio influencia a força de ligação e a eficiência de remoção.

3.4 Resultados gerais dos tratamentos

A Tabela 5 apresenta os valores médios de concentração final de arsênio. No caso do bioadsorvente de limão, os percentuais de remoção variaram de aproximadamente 34% para doses baixas e tempos curtos até cerca de 56% para as doses e tempos mais elevados avaliados.

Tabela 5 – Resultados experimentais de remoção de arsênio total**Table 5** – Experimental results of total arsenic removal

Bioadsorvente	Dose (g/L)	Tempo (min)	Cf_As médio (mg/L)	Desvio-padrão (mg/L)	% Remoção	q (mg/g)
Limão	0	0	0,082	0,011	–	–
Limão	1	30	0,054	0,001	34,1%	0,028
Limão	1	60	0,052	0	36,6%	0,030
Limão	1	90	0,054	0,001	34,1%	0,028
Limão	2	30	0,046	0,002	43,9%	0,018
Limão	2	60	0,050	0,002	39,0%	0,016
Limão	2	90	0,050	0,002	39,0%	0,016
Limão	4	30	0,045	0,001	45,1%	0,009
Limão	4	60	0,046	0,005	43,9%	0,009
Limão	4	90	0,042	0,002	48,8%	0,010
Limão	8	30	0,036	0,006	56,1%	0,006
Limão	8	60	0,039	0,001	52,4%	0,005
Limão	8	90	0,041	0,008	50,0%	0,005
Maracujá	0	0	0,082	0,011	–	–
Maracujá	1	30	0,037	0,002	54,9%	0,045
Maracujá	1	60	0,032	0	61,0%	0,050
Maracujá	1	90	0,042	0,001	48,8%	0,040
Maracujá	2	30	0,024	0,001	70,7%	0,029
Maracujá	2	60	0,026	0,001	68,3%	0,028
Maracujá	2	90	0,038	0,001	53,7%	0,022
Maracujá	4	30	0,008	0	90,2%	0,019
Maracujá	4	60	0,008	0	90,2%	0,019
Maracujá	4	90	0,028	0,002	65,9%	0,014
Maracujá	8	30	0,035	0	57,3%	0,006
Maracujá	8	60	0,049	0,001	40,2%	0,004
Maracujá	8	90	0,066	0,001	19,5%	0,002

Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Por sua vez, a farinha de maracujá apresentou percentuais de remoção superiores a 70% a partir de 2 g/L e 30 minutos, atingindo valores máximos próximos de 90% sob condições ótimas de dose e tempo. As desvios-padrão associados aos resultados foram baixos na maioria dos casos, o que evidencia boa reprodutibilidade experimental e controle na execução dos ensaios. Entretanto, a farinha de casca de maracujá destacou-se por sua maior eficiência na maioria das combinações avaliadas, o que pode estar relacionado ao seu maior teor de cinzas (minerais) e diversidade funcional, conforme analisado previamente. Além disso, a faixa de eficiência alcançada neste estudo é comparável à reportada para outros bioadsorventes lignocelulósicos na literatura, confirmando a adequação desses materiais para aplicações de biorremediação em zonas rurais afetadas por contaminação por arsênio (Iliná et al., 2009; Marín-Rangel et al., 2012).

Em termos de capacidade de adsorção, a coluna q confirma a vantagem do maracujá em condições comparáveis (1 g/L, 60 min: 0,050 mg g⁻¹) frente ao limão (0,030 mg g⁻¹), e mostra o decréscimo esperado de q quando a dose é aumentada, por exemplo, limão a 8 g/L e 60 min: 0,005 mg g⁻¹, sob volume e concentração inicial fixos.

3.5 Influência das variáveis operacionais

As Tabelas 6, 7, 8 e 9 apresentam a análise estatística dos ensaios experimentais de remoção de arsênio, considerando como variáveis independentes a dose do bioadsorvente e o tempo de contato. Para a farinha de casca de limão (Tabelas 6 e 7), o modelo de superfície de resposta explicou 83,9% da variabilidade experimental (R²), com R² ajustado de 79,87% e R² predito de 65,84%, indicando ajuste aceitável do modelo aos dados experimentais.

Tabela 6 – Resumo do modelo para farinha de limão

Table 6 – Model summary for lime flour

S	R-quadrado	R-quadrado (ajustado)	R-quadrado (predito)
0,0052234	83,90%	79,87%	65,84%

Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Tabela 7 – Análise de variância para farinha de limão

Table 7 – Analysis of variance for lime flour

Fonte	GL	SQ Ajust.	QM Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	0,002843	0,000569	20,84	0,000
Linear	2	0,002270	0,001135	41,60	0,000
Dose g/L	1	0,001004	0,001004	36,79	0,000
Tempo min	1	0,000132	0,000132	4,83	0,040
Quadrático	2	0,000399	0,000200	7,31	0,004
Dose g/L*Dose g/L	1	0,000095	0,000095	3,49	0,077
Tempo min*Tempo min	1	0,000173	0,000173	6,34	0,020
Interação de 2 fatores	1	0,000067	0,000067	2,47	0,132
Dose g/L*Tempo min	1	0,000067	0,000067	2,47	0,132
Erro	20	0,000546	0,000027		
Falta de ajuste	7	0,000266	0,000038	1,77	0,178
Erro puro	13	0,000280	0,000022		
Total	25	0,003389			

Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Tabela 8 – Resumo do modelo para farinha de maracujá

Table 8 – Model summary for passion fruit flour

S	R-quadrado	R-quadrado (ajustado)	R-quadrado (predito)
0,0041302	96,68%	95,85%	92,71%

Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Tabela 9 – Análise de variância para farinha de maracujá
Table 9 – Analysis of variance for passion fruit flour

Fonte	GL	SQ Ajust.	QM Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	0,009935	0,001987	116,49	0,000
Linear	2	0,000448	0,000224	13,14	0,000
Dose g/L	1	0,000356	0,000356	20,84	0,000
Tempo min	1	0,000007	0,000007	0,43	0,521
Quadrático	2	0,005944	0,002972	174,22	0,000
Dose g/L*Dose g/L	1	0,003447	0,003447	202,08	0,000
Tempo min*Tempo min	1	0,000749	0,000749	43,89	0,000
Interação de 2 fatores	1	0,000475	0,000475	27,83	0,000
Dose g/L*Tempo min	1	0,000475	0,000475	27,83	0,000
Erro	20	0,000341	0,000017		
Falta de ajuste	7	0,000197	0,000028	2,53	0,071
Erro puro	13	0,000144	0,000011		
Total	25	0,010276			

Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

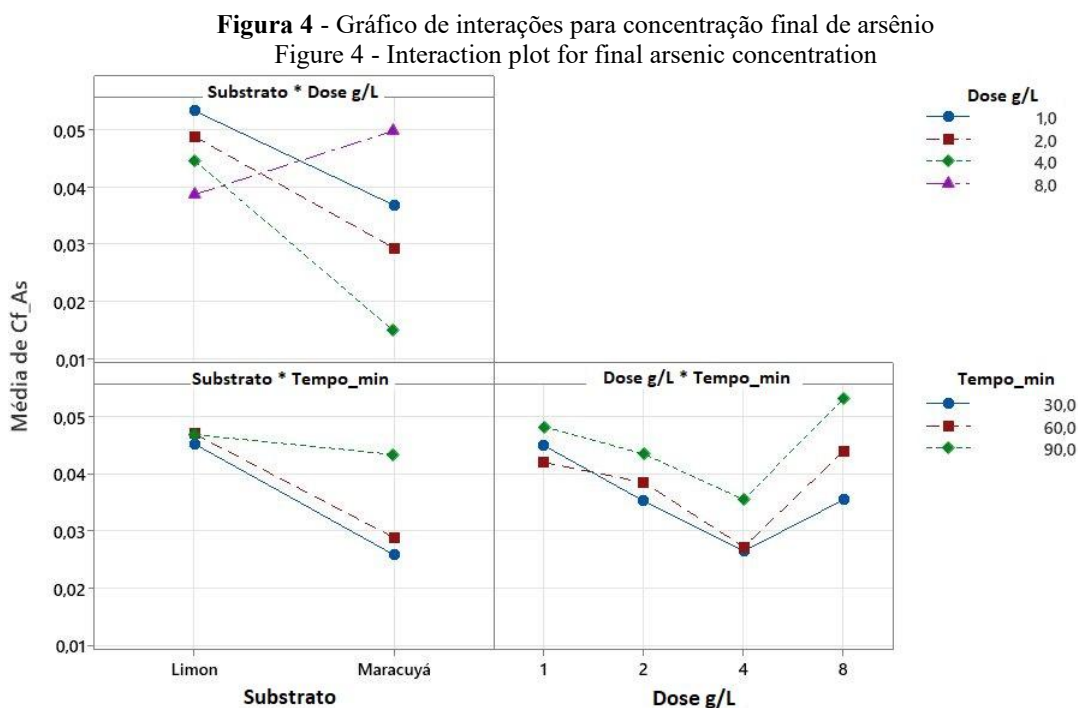
Além disso, a análise de variância (ANOVA) confirma que a dose é o fator de maior impacto ($p < 0,001$) e que o tempo também contribui, ainda que em menor magnitude ($p = 0,040$). A significância do termo tempo×tempo ($p = 0,020$) indica curvatura, coerente com o comportamento não monotônico observado nos tratamentos: ao aumentar o tempo, a remoção não cresce de forma contínua. Por exemplo, na dose de 8 g/L, a remoção é máxima em 30 min (56,1%; Cf = 0,036 mg/L) e diminui em 60 min (52,4%; Cf = 0,039 mg/L) e 90 min (50,0%; Cf = 0,041 mg/L). De forma similar, em 4 g/L, a remoção aumenta de 45,1% (30 min; Cf = 0,045 mg/L) para 48,8% (90 min; Cf = 0,042 mg/L), mas sem um ganho proporcional. A interação dose×tempo não foi significativa ($p = 0,132$), sugerindo que, para o limão, o efeito da dose tende a se manter relativamente estável ao longo dos tempos testados, com o tempo atuando como ajuste secundário. Em termos de capacidade de adsorção, observa-se o padrão esperado de redução de q com o aumento da dose, sob C0 e volume constantes, por exemplo, em 1 g/L e 60 min, $q = 0,030$ mg/g, enquanto em 8 g/L e 60 min, $q = 0,005$ mg/g, indicando diluição do carregamento por massa e possível limitação de sítios efetivos por aglomeração do material em doses elevadas.

Para a farinha de casca de maracujá (Tabelas 8 e 9), o desempenho estatístico é superior, com R^2 de 96,68%, R^2 ajustado de 95,85% e R^2 predito de 92,71%, mostrando elevada capacidade explicativa e preditiva. Diferentemente do limão, o termo linear do tempo não foi significativo ($p = 0,521$), mas os termos quadráticos dose×dose e tempo×tempo foram significativos ($p < 0,001$), assim como a interação dose×tempo ($p < 0,001$), o que caracteriza uma resposta com ótimo operacional e dependência condicional do tempo em função da dose. Esse padrão aparece de forma clara nos resultados experimentais. Em 4 g/L, o material atinge as maiores remoções e as menores concentrações finais, com 90,2% em 30 min (Cf = 0,008 mg/L) e 90,2% em 60 min (Cf = 0,008 mg/L), mantendo desempenho elevado com tempo moderado. Em contraste, em 8 g/L há queda acentuada de eficiência com o aumento do tempo, chegando a 19,5% em 90 min (Cf = 0,066 mg/L), o que reforça o efeito não linear e sugere que doses excessivas podem reduzir a disponibilidade de sítios por aglomeração, aumentar competição interna ou favorecer reversão parcial da retenção ao longo do contato. A maior eficiência do maracujá também se reflete em q sob condições comparáveis, por exemplo, em 1 g/L e 60 min, $q = 0,050$ mg/g, superior ao limão (0,030 mg/g), indicando maior afinidade e melhor aproveitamento da massa do adsorvente em doses baixas.

Nesse sentido, os resultados confirmam a importância tanto da dose quanto do tempo de contato para maximizar a eficiência de remoção de arsênio em ambos os bioadsorventes, sendo a farinha de maracujá a que apresenta maior sensibilidade e resposta à variação das condições operacionais. O ajuste mais elevado do modelo para maracujá pode estar associado a maior homogeneidade e capacidade de interação de seus componentes funcionais, permitindo predição mais precisa do comportamento experimental (Mele et al., 2024). A significância dos termos quadráticos em ambos os modelos indica que existem limites superiores de eficiência, além dos quais o aumento de dose ou tempo não produz melhorias proporcionais e pode inclusive resultar em redução da remoção (Nouaa et al., 2024), como evidenciado pelos valores experimentais em doses ou tempos excessivos.

3.6 Análise fatorial

Na Figura 4 observa-se que a dose é o fator dominante: ao passar de 1 para 4 g/L, a concentração final média diminui de 0,04508 para 0,02975 mg/L (redução absoluta de 0,01533 mg/L, ~34% em relação ao valor em 1 g/L; diferença significativa na análise de um fator, valor $p = 0,018$).



Fonte: Elaboração dos autores
Source: Prepared by the authors

O tempo de contato mostra contribuição menor e não monotônica na análise de um fator (médias: 30 min = 0,03556; 60 min = 0,03794; 90 min = 0,04512 mg/L; valor $p = 0,120$), embora no modelo fatorial geral seu efeito torne-se significativo quando consideradas as interações (valor $p < 0,001$). Entre materiais, *Passiflora edulis* (maracujá) apresenta média de 0,03271 mg/L e *Citrus aurantifolia* (limão) 0,04638 mg/L (diferença de 0,01367 mg/L, valor $p < 0,001$). Em termos operacionais, a figura respalda priorizar a dosagem e utilizar o tempo para ajustar o desempenho, especialmente com maracujá.

O exposto está alinhado ao resumo do modelo fatorial mostrado na Tabela 11 (coeficiente de determinação = 98,10%; ajustado = 96,27%; predito = 92,38%), e à Tabela 10, onde os termos lineares de

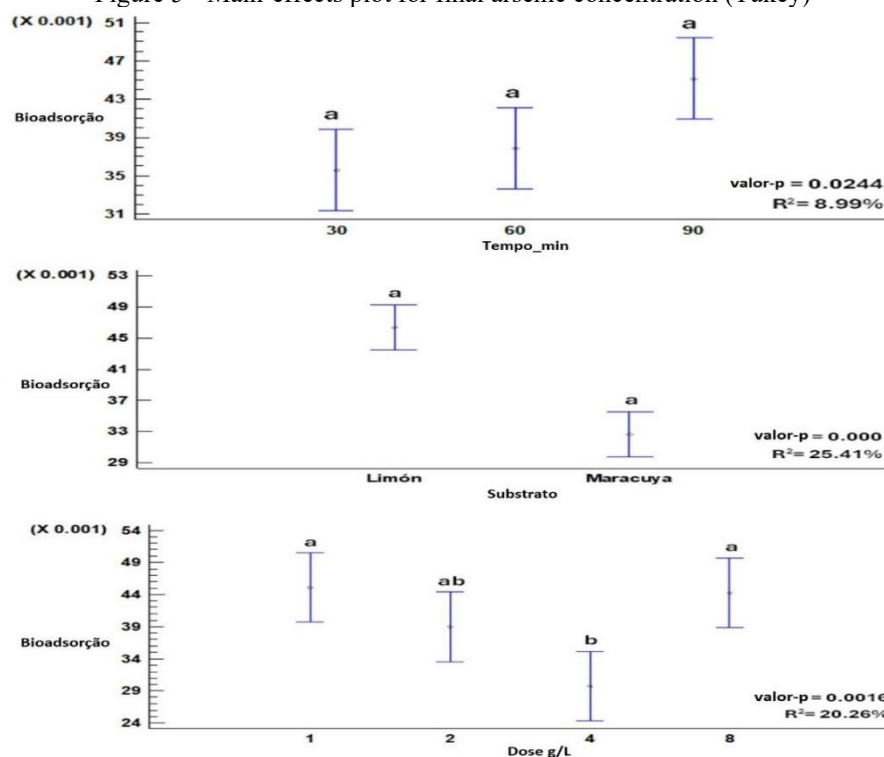
dose, tempo e material, assim como suas interações de dois e três fatores, resultaram significativos. Portanto, a dose lidera o processo de tratamento; o tempo modula e torna-se relevante ao interagir com os demais fatores; além disso, evidencia-se que o maracujá mantém vantagem média sobre o limão.

A Figura 4 avalia a dependência mútua entre os fatores; nesse sentido, o modelo fatorial geral (Tabela 10) mostra uma interação dose \times tempo estatisticamente significativa ($F = 6,02$; $p = 0,001$), além de interações substrato \times dose ($F = 131,44$; $p < 0,001$) e substrato \times tempo ($F = 44,52$; $p < 0,001$). A interação de três termos (substrato \times dose \times tempo) também resulta significativa ($F = 4,64$; $p = 0,003$). Graficamente, essas relações traduzem-se em linhas não paralelas para *Passiflora edulis*, indicando que o ganho atribuível ao aumento da dose varia com o tempo de contato; em *Citrus aurantifolia* as linhas são próximas ao paralelismo, sugerindo um comportamento mais próximo da aditividade dentro do intervalo avaliado.

Por sua vez, a Figura 5, baseada em comparações de Tukey (95%), apresenta o ranking marginal dos fatores sobre a concentração final de arsênio.

Figura 5 - Gráfico de efeitos principais para concentração final de arsênio (Tukey)

Figure 5 - Main-effects plot for final arsenic concentration (Tukey)



Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Tabela 10 – Análise de variância do modelo fatorial geral

Table 10 – Analysis of variance for the general factorial model

Fonte	GL	SQ Ajust.	QM Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	23	0,008654	0,000376	53,75	0,000
Linear	6	0,004822	0,000804	114,81	0,000
Substrato	1	0,002241	0,002241	320,19	0,000
Dose g/L	3	0,001788	0,000596	85,12	0,000

Tempo min	2	0,000793	0,000397	56,66	0,000
Interações de 2 termos	11	0,003637	0,000331	47,23	0,000
Substrato*Dose g/L	3	0,002760	0,000920	131,44	0,000
Substrato*Tempo min	2	0,000623	0,000312	44,52	0,000
Dose g/L*Tempo min	6	0,000253	0,000042	6,02	0,001
Interações de 3 termos	6	0,000195	0,000033	4,64	0,003
SubstratoDose g/LTempo min	6	0,000195	0,000033	4,64	0,003
Erro	24	0,000168	0,000007		
Total	47	0,008822			

Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Tabela 10 – Resumo do modelo fatorial

Table 11 – Summary of the factorial model

S	R-quadrado	R-quadrado (ajustado)	R-quadrado (predito)
0,0026458	98,10%	96,27%	92,38%

Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

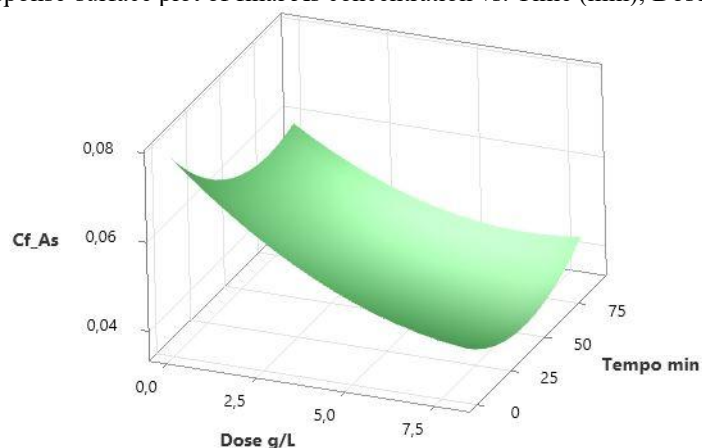
O substrato explica a maior variação ($R^2 = 25,41\%$; $p < 0,001$), com médias mais baixas para *P. edulis*; em seguida, a dose ($R^2 = 20,26\%$; $p = 0,0016$) apresenta padrão não linear, no qual 4 g/L se distingue (letra “b”), 1 e 8 g/L compartilham grupo (“a”) e 2 g/L situa-se intermediário (“ab”), sugerindo um limiar operacional em torno de 4 g/L. Por último, o tempo contribui menos ($R^2 = 8,99\%$; $p = 0,0244$) e não separa com clareza 30–60–90 min. Essa leitura resume qual fator e quais níveis são mais determinantes em média, enquanto a dependência entre fatores (não aditividade) é documentada na Figura 4.

3.7 Condições ótimas de remoção

A Figura 6 apresenta a superfície de resposta para a concentração final de arsênio em função da dose da farinha de casca de limão e do tempo de contato. Observa-se que, à medida que ambos os fatores aumentam, a concentração residual de arsênio diminui progressivamente, alcançando um platô na região de doses elevadas e tempos intermediários a prolongados. Essa visualização tridimensional permite identificar não apenas a tendência geral do sistema, mas também os limites a partir dos quais aumentos adicionais na dose ou no tempo deixam de se traduzir em melhorias significativas na remoção.

Figura 6 – Gráfico de superfície da concentração final de As vs. Tempo (min); Dose (g/L) para farinha de casca de limão

Figure 6 - Response-surface plot of final As concentration vs. Time (min); Dose (g L⁻¹) for lime flour



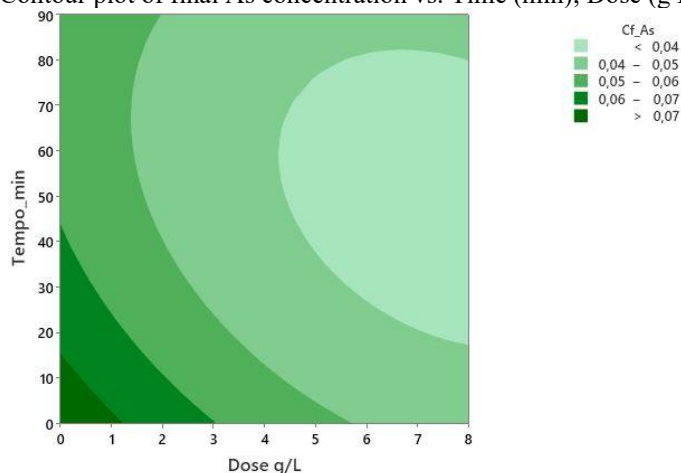
Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Complementarmente, a Figura 7 apresenta o gráfico de contorno correspondente, no qual as linhas de igual concentração (isoconcentrações) delimitam, de forma intuitiva, combinações específicas de dose e tempo que resultam em concentrações finais de arsênio abaixo de certos limiares críticos.

Figura 7 – Gráfico de contorno da concentração final de As vs. Tempo (min); Dose (g/L) para farinha de casca de limão

Figure 7 - Contour plot of final As concentration vs. Time (min); Dose (g L⁻¹) for lime flour



Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

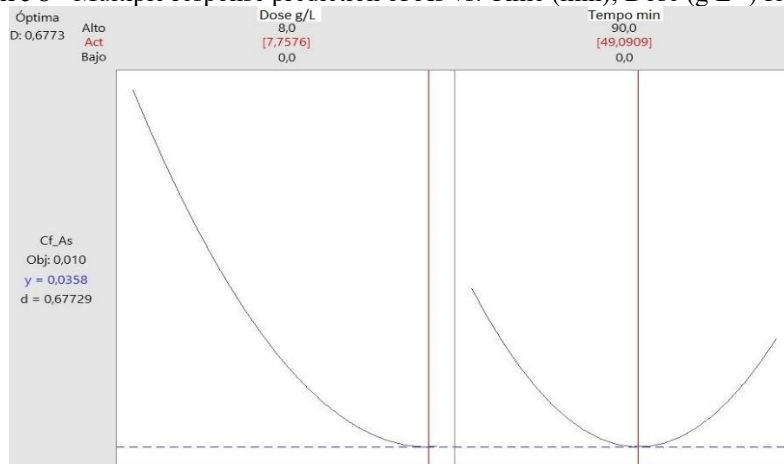
Nesse sentido, esse enfoque facilita a tomada de decisão operacional, pois permite selecionar a configuração mais eficiente de recursos para alcançar metas de qualidade.

A Figura 8 consolida as informações anteriores por meio da predição de resposta múltipla, mostrando os valores ótimos dos fatores e a concentração de arsênio esperada nas referidas condições. Visualizam-se claramente os intervalos de confiança e a robustez estatística do modelo, validando que as condições ótimas propostas de fato maximizam a eficiência de remoção dentro dos limites experimentais avaliados. Por sua vez,

a Tabela 12 apresenta a solução ótima determinada para a farinha de casca de limão, em que o modelo prediz uma concentração final mínima de arsênio (0,036 mg/L) empregando uma dose de 7,76 g/L e um tempo de contato de 49,1 minutos, com desejabilidade composta de 0,68.

Figura 8 – Predição de resposta múltipla de As vs. Tempo (min); Dose (g/L) para farinha de casca de limão

Figure 8 - Multiple response prediction of As vs. Time (min); Dose (g L⁻¹) for lime flour



Fonte: Elaboração dos autores
Source: Prepared by the authors

Tabela 12 – Solução da otimização de resposta para farinha de casca de limão

Table 12 – Response optimisation solution for lime flour

Solução	Dose g/L	Tempo min	Cf_As (mg/L)	Desejabilidade composta
1	7,75758	49,0909	0,0358170	0,677288

Fonte: Elaboração dos autores
Source: Prepared by the authors

Na Figura 8, ilustra-se a superfície de resposta, na qual se observa uma inclinação muito mais pronunciada do que para o limão, evidenciando maior sensibilidade do sistema a variações de dose e tempo; de forma destacada, obtém-se uma concentração final de arsênio muito baixa mesmo com doses e tempos moderados, o que sublinha a eficiência superior desse bioadsorvente.

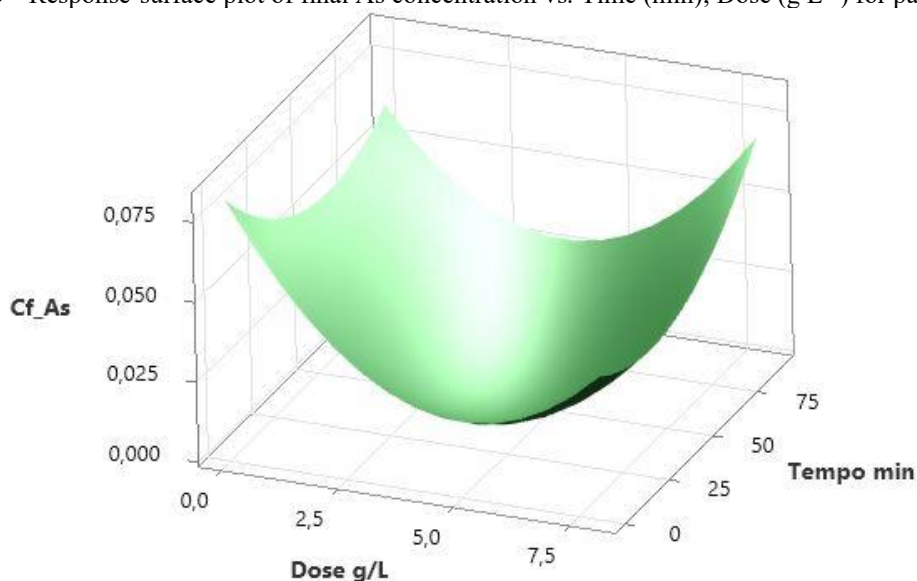
Além disso, a Figura 9 reforça essa interpretação, pois revela uma região ótima mais extensa e bem definida dentro do espaço experimental; isso implica maior flexibilidade para ajustar as condições operacionais sem perda de eficácia, uma vantagem significativa para a adaptação da tecnologia a cenários reais de tratamento.

Por sua vez, a Figura 10 apresenta a predição de resposta múltipla, sintetizando os parâmetros ótimos e o valor mínimo de arsênio alcançável segundo o modelo estatístico; ademais, os intervalos de predição estreitos confirmam a precisão e a confiabilidade do ajuste obtido para o maracujá, validando a aplicabilidade dos resultados e seu potencial para o projeto e o escalonamento de processos de remoção de arsênio.

A Tabela 13 revela que a dose e o tempo ótimos preditos pelo modelo (3,92 g/L e 29,1 minutos, respectivamente) permitem atingir uma concentração final ajustada de arsênio de apenas 0,010 mg/L, com desejabilidade composta próxima do valor ideal (0,999).

Figura 9 – Gráfico de superfície da concentração final de As vs. Tempo (min); Dose (g/L) para farinha de casca de maracujá

Figure 9 - Response-surface plot of final As concentration vs. Time (min); Dose (g L⁻¹) for passion fruit flour

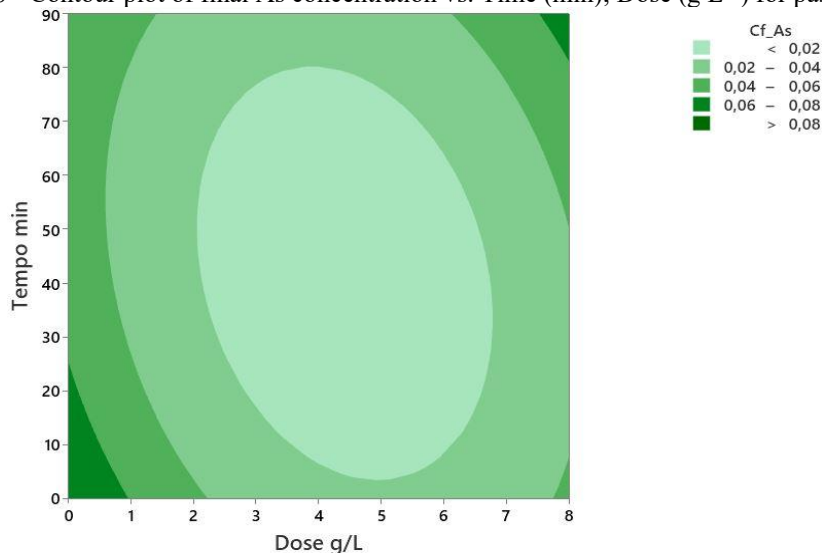


Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

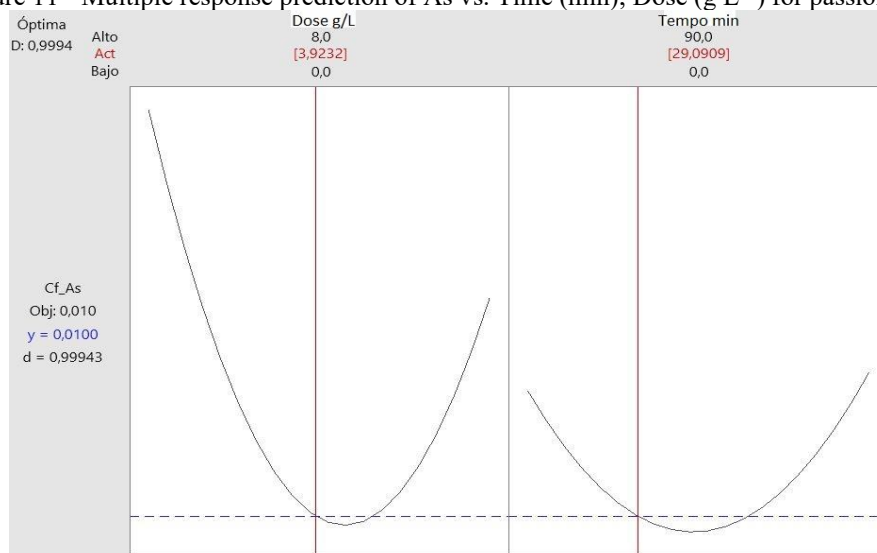
Figura 10 – Gráfico de contorno da concentração final de As vs. Tempo (min); Dose (g/L) para farinha de casca de maracujá

Figure 10 - Contour plot of final As concentration vs. Time (min); Dose (g L⁻¹) for passion fruit flour



Fonte: Elaboração dos autores

Source: Prepared by the authors

Figura 11 – Predição de resposta múltipla de As vs. Tempo (min); Dose (g/L) para farinha de casca de maracujáFigure 11 - Multiple response prediction of As vs. Time (min); Dose (g L⁻¹) for passion fruit flour

Fonte: Elaboração dos autores
Source: Prepared by the authors

Tabela 13 – Solução de otimização de resposta para farinha de casca de maracujá**Table 13** – Response optimisation solution for passion fruit flour

Solução	Dose g/L	Tempo min	Cf_As (mg/L)	Desejabilidade composta
1	3,92315	29,0909	0,0100453	0,999434

Fonte: Elaboração dos autores
Source: Prepared by the authors

Por fim, os resultados obtidos demonstram que a farinha de casca de maracujá supera amplamente a de limão em termos de eficiência de remoção de arsênio, conseguindo cumprir o limite máximo permissível para água de consumo humano com doses e tempos de contato notavelmente menores; essa superioridade pode ser explicada pelo maior teor de cinzas e pela maior diversidade funcional da farinha de maracujá, evidenciadas na análise proximal e no FTIR, respectivamente (Zango et al., 2025). Em particular, a abundância de grupos hidroxila, carboxila e carbonila em ambas as matrizes, identificada por espectroscopia FTIR, facilita a interação com espécies arsenicais, mas a maior densidade e acessibilidade desses sítios no maracujá potencializa os mecanismos de adsorção (Gerola et al., 2013).

4. Discussão

Os resultados obtidos nos tratamentos experimentais evidenciam que tanto a farinha de casca de *Citrus aurantifolia* quanto a de *Passiflora edulis* apresentam capacidade significativa para remover arsênio de água contaminada em condições laboratoriais. A eficiência de remoção alcançada com ambos os bioadsorventes é consistente com estudos prévios sobre materiais lignocelulósicos, que reportaram percentuais de remoção de arsênio superiores a 70% em sistemas descontínuos (Iliná et al., 2009; Marín-Rangel et al., 2012).

Entretanto, destaca-se a farinha de maracujá, que atingiu eficiências próximas a 90% sob condições ótimas, superando amplamente os valores observados para a farinha de limão e posicionando-se como um

bioadsorvente altamente competitivo em relação a outros resíduos agroindustriais avaliados na literatura regional (Maia et al., 2023). Esse comportamento pode ser atribuído, em parte, ao maior teor de cinzas e à maior diversidade funcional identificada na caracterização proximal e por FTIR, respectivamente, o que aumenta o número e o tipo de sítios ativos disponíveis para a adsorção de espécies arsenicais (Dhanasekaran et al., 2016; Garba et al., 2019).

Além disso, o baixo desvio-padrão registrado na maioria dos tratamentos confirma a reprodutibilidade e a robustez experimental dos resultados, conferindo confiança quanto à aplicabilidade potencial de ambos os materiais em maior escala. Nesse sentido, embora os ensaios tenham sido conduzidos em condições laboratoriais controladas, o fato de alcançar concentrações residuais de arsênio inferiores a 0,010 mg/L, em conformidade com os padrões nacionais e as recomendações internacionais da OMS e da EPA, ressalta a relevância desses materiais para aplicações reais em áreas rurais e periurbanas afetadas pela contaminação arsenical.

A análise estatística e de correlação demonstra que tanto a dose do bioadsorvente quanto o tempo de contato influenciam significativamente a eficiência de remoção de arsênio, ainda que com diferenças relevantes entre os materiais. Para a farinha de limão, a dose emerge como fator dominante, enquanto o tempo de contato exerce efeito adicional, porém mais limitado, e a interação dose-tempo não foi estatisticamente significativa. Em contraste, o modelo para a farinha de maracujá revela que ambos os fatores, e especialmente seus efeitos quadráticos e de interação, contribuem substancialmente para a variabilidade experimental, com ajuste preditivo notavelmente superior (R^2 ajustado = 95,85%).

Nesse contexto, a farinha de maracujá oferece uma faixa operacional mais flexível e eficiente, aspecto altamente favorável ao desenho e à adaptação de processos em contextos variáveis de tratamento de água. Por sua vez, a relevância da significância dos termos quadráticos evidencia a existência de condições ótimas finitas, além das quais incrementos adicionais de dose ou tempo podem conduzir a eficiência marginal decrescente ou até mesmo a fenômenos de dessorção, como reportado em outros sistemas adsorventes naturais (Mele et al., 2024; Nouaa et al., 2024). Cabe destacar, entretanto, que a possível presença de interferentes em águas naturais (como sulfatos, fosfatos, ferro, entre outros) pode afetar a eficiência observada, ressaltando a importância de realizar estudos de campo e de transferência tecnológica em colaboração com comunidades locais (Marzi et al., 2022; Yadegari et al., 2024).

Os achados obrigam a traduzir a comparação experimental em regras de projeto e controle diferenciadas por substrato: a dosagem atua como alavanca primária, mas a dependência condicional em relação ao tempo exige políticas baseadas em combinações e não em pontos de ajuste univariados (Umare et al., 2024). Em *Passiflora edulis*, o tempo modula o gradiente de melhoria associado à dose; portanto, a operação deve estabelecer faixas de dose-tempo com valores nominais e tolerâncias, aplicando coajustes diante de variações do afluente (abordagem feed-forward) para alcançar o set point de concentração final sem penalizar desnecessariamente o tempo de retenção (Sakizadeh et al., 2024; Zanoni et al., 2022).

Em *Citrus aurantifolia*, o comportamento mais próximo à aditividade permite estratégias de controle simplificadas: priorizar a dose e reservar o tempo como parâmetro de ajuste fino, favorecendo esquemas estáveis quando se privilegia a produtividade hidráulica em detrimento de máximos de eficiência (Thevenot et al., 2025). A evidência inferencial do modelo respalda a transferência dessas diretrizes à escala piloto mediante janelas operacionais verificáveis (nominais e limites), campanhas de confirmação em pontos intermediários do espaço experimental (não apenas extremos) e o reporte da capacidade de adsorção (q) nesses pontos, de forma a comparar desempenho e consumo específico de material (Sakizadeh et al., 2024; Zanoni et al., 2022). Ademais, a não aditividade documentada desaconselha extrapolações lineares fora da faixa estudada: mudanças em dose, tempo ou química da matriz (pH, fosfato, sílica, alcalinidade) devem ser reavaliadas com desenhos fatoriais de confirmação, mantendo aleatorização, pontos centrais e diagnósticos de ajuste. Dessa forma, a comparação entre farinhas deixa de ser um ranking estático e converte-se em um marco

operacional reprodutível para selecionar, ajustar e auditar condições em escala de planta (Kabiraj et al., 2025; Pan et al., 2022; Umare et al., 2024).

A identificação das condições ótimas de operação, respaldada pelo modelo estatístico e pela função de desejabilidade composta, permite não apenas maximizar a eficiência de remoção, mas também racionalizar o uso de recursos e minimizar os tempos de tratamento, o que é fundamental para a sustentabilidade e a escalabilidade de tecnologias de biorremediação (Bayuo et al., 2022).

Neste estudo, a farinha de maracujá demonstrou ser capaz de reduzir a concentração de arsênio abaixo do limite máximo permissível (0,010 mg/L) com dose e tempo substancialmente menores em comparação à farinha de limão, o que implica vantagens econômicas, logísticas e ambientais para sua implementação em contextos rurais e de baixos recursos. Esse resultado não apenas posiciona a farinha de maracujá como alternativa de alto valor agregado para a gestão local de resíduos agroindustriais, mas também fornece evidências empíricas para o desenvolvimento de tecnologias baseadas em economia circular e no uso de materiais renováveis, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 6 e 12) (Ruby et al., 2025). Adicionalmente, a coerência entre a caracterização funcional (FTIR) e os resultados de otimização experimental sugere que o desenho racional de bioadsorventes deve considerar, de forma integrada, tanto a composição proximal quanto a diversidade de grupos funcionais, a fim de orientar a seleção de materiais e o ajuste de parâmetros em futuras pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos.

Sob a perspectiva da sustentabilidade e da economia circular, o uso de resíduos agroindustriais como matérias-primas para a remediação ambiental agrega valor às cadeias produtivas locais, reduz o volume de rejeitos e diminui a pegada ambiental associada ao transporte e à disposição final de resíduos agrícolas (Figueira et al., 2022). Embora o presente estudo não tenha realizado análise de ciclo de vida ou de custos, a simplicidade do processo de preparação e a disponibilidade regional desses materiais reforçam seu potencial como alternativas competitivas frente a tecnologias convencionais de remoção de arsênio (coagulação-floculação, osmose reversa, carvão ativado) (Zoroufchi Benis et al., 2020). Finalmente, a estrutura e a funcionalidade das farinhas estudadas sugerem potencial para a adsorção de outros contaminantes prioritários (chumbo, cádmio, corantes), o que pode diversificar suas aplicações no tratamento de águas residuárias industriais e urbanas, abrindo novas linhas de pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

5. Conclusão

O estudo demonstrou que tanto a farinha de casca de *Citrus aurantifolia* quanto a de *Passiflora edulis* apresentam capacidade significativa para remover As de água contaminada em condições laboratoriais. No entanto, a farinha de maracujá destacou-se por alcançar eficiências de remoção próximas a 90% sob condições ótimas, superando a farinha de limão (56%). Essa superioridade foi associada ao maior teor de cinzas e à diversidade funcional, confirmadas por sua caracterização proximal e espectroscópica, evidenciando não apenas a adequação desses materiais para aplicações de biorremediação em contextos rurais e periurbanos, mas também a viabilidade de revalorizar resíduos agroindustriais abundantes na região para o tratamento eficiente de águas contaminadas com As.

A análise estatística confirmou que a eficiência de remoção de As é fortemente influenciada pela dose do bioadsorvente e pelo tempo de contato, com diferenças marcantes entre os materiais. No caso da farinha de limão, a dose foi o fator mais determinante, enquanto para a farinha de maracujá observaram-se efeitos significativos e sinérgicos de ambos os fatores, incluindo suas interações quadráticas, o que permitiu um ajuste preditivo notavelmente elevado (R^2 ajustado > 95%). Nesse sentido, destaca-se a importância de uma otimização estatística rigorosa no desenho de tratamentos de biorremediação, dado que existe um limiar operacional além do qual incrementos adicionais em dose ou tempo não geram melhorias proporcionais na eficiência e podem até desencadear fenômenos de dessorção ou saturação dos sítios ativos. A análise fatorial complementar confirma que a dose é a alavanca determinante para reduzir a concentração final de As e que P .

edulis mantém vantagem sistemática frente a *C. aurantifolia* dentro da faixa avaliada. Ademais, a resposta não é plenamente aditiva, pois em *P. edulis* a eficácia da dosagem depende do tempo (não paralelismo), enquanto em *C. aurantifolia* o efeito da dose mantém-se relativamente estável ao longo dos tempos, em coerência com a significância das interações de dois e três termos e com a elevada capacidade explicativa e preditiva do modelo fatorial.

O uso de modelos de superfície de resposta e da função de desejabilidade composta permitiu identificar condições ótimas de operação para ambos os bioadsorventes. Particularmente, a farinha de maracujá conseguiu reduzir a concentração de As abaixo do limite máximo permissível para água potável ($< 0,010$ mg/L) com dose ótima de 3,92 g/L e tempo de contato de 29,1 minutos, alcançando concentração final ajustada de As de 0,010 mg/L e desejabilidade composta praticamente ideal (0,999). Essa notável eficiência implica vantagens econômicas, operacionais e ambientais para seu escalonamento em relação à farinha de limão, que demandou doses e tempos superiores para alcançar remoções menores.

Esses resultados sugerem que a seleção dos bioadsorventes deve considerar, de forma integral, a composição proximal e a diversidade funcional dos materiais, bem como o ajuste dos parâmetros operacionais, a fim de maximizar a eficiência e a sustentabilidade do processo. Ademais, a ampla disponibilidade e o baixo custo desses resíduos reforçam o potencial dessa estratégia no âmbito da economia circular, promovendo tecnologias ambientalmente sustentáveis e socialmente transferíveis para enfrentar a problemática do As na água potável.

6. Referências

- Ahad, R. I. A., Goswami, S., & Syiem, M. B. (2017). Biosorption and equilibrium isotherms study of cadmium removal by *Nostoc muscorum* Meg 1: Morphological, physiological and biochemical alterations. **3 Biotech**, 7(2). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0730-9>
- Bayuo, J., Rwiza, M., & Mtei, K. (2022). Response surface optimization and modeling in heavy metal removal from wastewater—A critical review. **Environmental Monitoring and Assessment**, 194(5). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09994-7>
- Carrasco, M., Baneco, V., Vázquez, E., Mejía, S., Orozco-Dávila, D., Montoya, P., & Liedo, P. (2025). Proximal and microbiological analysis of mass-reared *Anastrepha* spp. (Diptera: Tephritidae) larval flour and sensory evaluation for human consumption. **International Journal of Tropical Insect Science**. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s42690-025-01566-9>
- Dávila, B. R. R., & Flores-Cerna, J. C. (2022). Removal of arsenic by solar oxidation from groundwater in the town of Cruz de Medano, Lambayeque. 2022-July. Scopus. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.592>
- Dhanasekaran, P., Satya Sai, P. M., Anand Babu, C., Krishna Prabhu, R., & Rajan, K. K. (2016). Arsenic removal from groundwater by Anjili tree sawdust impregnated with ferric hydroxide and activated alumina. **Water Science and Technology: Water Supply**, 16(1), 115-127. Scopus. <https://doi.org/10.2166/ws.2015.119>
- Fano, D., Vázquez-Velásquez, C., Aguilar, J., Gribble, M. O., Wickliffe, J. K., Lichtveld, M. Y., Steenland, K., & Gonzales, G. F. (2020). Arsenic Concentrations in Household Drinking Water: A Cross-Sectional Survey of Pregnant Women in Tacna, Peru, 2019. **Exposure and Health**, 12(4), 555-560. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12403-019-00337-5>

- Figueira, P., Henriques, B., Teixeira, F., Afonso, N., Pinto, J., Tavares, D., Vale, C., & Pereira, E. (2022). Potentialities of Agro-Based Wastes to Remove Cd, Hg, Pb, and As from Contaminated Waters. **Water, Air, and Soil Pollution**, 233(3). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05543-7>
- Garba, J., Samsuri, W. A., Othman, R., & Hamdani, M. S. A. (2019). Evaluation of Adsorptive Characteristics of Cow Dung and Rice Husk Ash for Removal of Aqueous Glyphosate and Aminomethylphosphonic Acid. **Scientific Reports**, 9(1). Scopus. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54079-0>
- Garg, M. C., Kumari, S., & Malik, N. (2024). Role of nanomaterials in advanced membrane technologies for groundwater purification. **Environmental Science: Water Research and Technology**, 10(11), 2628-2645. Scopus. <https://doi.org/10.1039/d4ew00353e>
- Gerola, G. P., Boas, N. V., Caetano, J., Tarley, C. R. T., Gonçalves Jr., A. C., & Dragunski, D. C. (2013). Utilization of passion fruit skin by-product as Lead(II) Ion biosorbent. **Water, Air, and Soil Pollution**, 224(2). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1446-z>
- Hammad, W. A., Darweesh, M. A., Eweida, B., Amr, M. H. A., & Bakr, A. (2025). Exploring the efficiency of chemically activated palm frond carbon in heavy metal adsorption a modeling approach. **Scientific Reports**, 15(1). Scopus. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89047-4>
- Iliná, A., Martínez-Hernández, J. L., Segura-Ceniceros, E. P., Villarreal-Sánchez, J. A., & Gregorio-Jáuregui, K. M. (2009). Biosorción of arsenic in material derived from maracuya. **Revista Internacional de Contaminacion Ambiental**, 25(4), 201-216. Scopus.
- Irem, S., Islam, E., Mahmood Khan, Q., Ul Haq, M. A., & Jamal Hashmat, A. (2017). Adsorption of arsenic from drinking water using natural orange waste: Kinetics and fluidized bed column studies. **Water Science and Technology: Water Supply**, 17(4), 1149-1159. Scopus. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.009>
- Ivanovska, A., & Kostic, M. (2022). Chemical Modifications of Jute Fiber Properties for Lifecycle Enhancement by Utilizing in Wastewater Treatment. En *Jute: Cultivation, Properties and Uses* (pp. 51-94). **Nova Science Publishers, Inc.**; Scopus. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85148259886&partnerID=40&md5=965aa5a8997bfb73657d59db9a8b84c0>
- Kabiraj, A., Datta, S., & Bandopadhyay, R. (2025). Arsenic Removal from Water by Using Bacterial Dry Biomasses. **National Academy Science Letters**, 48(3), 393-397. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s40009-024-01467-4>
- Kakinuma, K., & Wada, Y. (2024). Gender inequality in global water security. **Environmental Research Letters**, 19(11). Scopus. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad8461>
- Kumar, A., Bhattacharya, T., Shaikh, W. A., Chakraborty, S., Owens, G., & Naushad, M. (2022). Valorization of fruit waste-based biochar for arsenic removal in soils. **Environmental Research**, 213. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113710>
- Kumar, R., Patel, M., Singh, P., Bundschuh, J., Pittman, C. U., Trakal, L., & Mohan, D. (2019). 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**, 694. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.233>

Maia, L. C., Soares, L. C., Carvalho, M. M. C. E., dos Santos, G. R., de Azevedo, E. R., Soares, J. D. S., & Gurgel, L. V. A. (2023). Synthesis and application of an unprecedented bioadsorbent for removing arsenic from aqueous systems. **Separation and Purification Technology**, 324. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124495>

Marín-Rangel, V. M., Cortés-Martínez, R., Cuevas Villanueva, R. A., Garnica-Romo, M. G., & Martínez-Flores, H. E. (2012). As (V) biosorption in an aqueous solution using chemically treated lemon (*Citrus aurantifolia* Swingle) residues. **Journal of Food Science**, 77(1), T10-T14. Scopus. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02466.x>

Marzi, M., Towfighi, H., Shahbazi, K., Farahbakhsh, M., & Kazemian, H. (2022). Study of arsenic adsorption in calcareous soils: Competitive effect of phosphate, citrate, oxalate, humic acid and fulvic acid. **Journal of Environmental Management**, 318. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115532>

Mele, M. A., Kumar, R., Dada, T. K., Heydari, A., & Antunes, E. (2024). Investigation of gold adsorption by ironbark biochar using response surface methodology and artificial neural network modelling. **Journal of Cleaner Production**, 456. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142317>

Ministerio de Salud. (2011). **Decreto Supremo N.º 031-2010-SA: Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano**. <https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/244805-031-2010-sa>

Mohsin, A., Akhtar, S., & Mohsin, F. (2025). Evaluating drinking water quality and associated health risks in primary schools of Punjab: A multi-method approach combining conventional analysis, Monte Carlo simulation, and geospatial mapping. **Environmental Earth Sciences**, 84(13). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12354-6>

Murray, J., Tapia, J., Ormachea, M., Tirado, N., & Nordstrom, D. K. (2023). Towards a comprehensive understanding of the “Origin, distribution, and biogeochemistry of arsenic in the Altiplano-Puna plateau of South America” with the IGCP-707 project. **Episodes**, 46(4), 653-664. Scopus. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2023/023017>

Nouaa, S., Aziam, R., Benhiti, R., Carja, G., Zerbet, M., & Chiban, M. (2024). Exploiting RSM and ANN modeling methods to optimize phosphate ions removal using LDH/alginate composite beads. **Journal of Water Process Engineering**, 68. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106333>

Ntwampe, I. O. (2021). The removal of Mg²⁺ and Ca²⁺ and turbidity from aqueous solution employing copolymerization of ethyl acrylate onto guar gum. **Water Practice and Technology**, 16(1), 276-288. Scopus. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.115>

OECD. (1998). **Principios de Buenas prácticas de laboratorio de la OCDE**. <https://www.oecd.org/en/topics/sub-issues/testing-of-chemicals/good-laboratory-practice-and-compliance-monitoring.html>

OMS. (2017). **Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda**. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>

Pan, F., Wang, B., Zhang, Y., Zhang, X., Cai, Y., Liu, H., Guo, Z., & Wang, X. (2022). Bioavailability, (im)mobilization kinetics, and spatiotemporal patterns of arsenic and cadmium in surficial sediments of a river–estuary–coast system. **Journal of Hydrology**, 612. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128140>

Pramanik, A., Gates, K., Gao, Y., Zhang, Q., Han, F. X., Begum, S., Rightsell, C., Sardar, D., & Ray, P. C. (2019). Composites Composed of Polydopamine Nanoparticles, Graphene Oxide, and ϵ -Poly-L-lysine for Removal of Waterborne Contaminants and Eradication of Superbugs. **ACS Applied Nano Materials**, 2(6), 3339-3347. Scopus. <https://doi.org/10.1021/acsanm.9b00161>

Ruby, R., Dimple, D., & Giri, A. (2025). Suitability of the Himalayan water quality for domestic and irrigation use: A systematic review and meta-analysis. **Chemosphere**, 382. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144410>

Sakizadeh, M., Zhang, C., & Milewski, A. (2024). Spatial distribution pattern and health risk of groundwater contamination by cadmium, manganese, lead and nitrate in groundwater of an arid area. **Environmental Geochemistry and Health**, 46(3). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01845-9>

Shaji, E., Santosh, M., Sarath, K. V., Prakash, P., Deepchand, V., & Divya, B. V. (2021). Arsenic contamination of groundwater: A global synopsis with focus on the Indian Peninsula. **Geoscience Frontiers**, 12(3). Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.015>

Sirajudheen, P., Vigneshwaran, S., Thomas, N., Selvaraj, M., Assiri, M. A., & Park, C. M. (2024). Critical assessment of recent advancements in chitosan-functionalized iron and geopolymer-based adsorbents for the selective removal of arsenic from water. **Environmental Monitoring and Assessment**, 196(10). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13087-y>

Thevenot, X. M., Roy, T., Pakostova, E., Rosa, E., Coudert, L., & Neculita, C. M. (2025). Performance of field-pilot passive biofilters using peat and Fe-rich sludge to remove arsenic from neutral mine drainage under a subarctic climate. **Science of the Total Environment**, 993. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179984>

Tolkou, A. K., Katsoyiannis, I. A., & Zouboulis, A. I. (2020). Removal of arsenic, chromium and uranium from water sources by novel nanostructured materials including graphene-based modified adsorbents: A mini review of recent developments. **Applied Sciences (Switzerland)**, 10(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/app10093241>

Umare, S., Thawait, A. K., & Dhawane, S. H. (2024). Remediation of arsenic and fluoride from groundwater: A critical review on bioadsorption, mechanism, future application, and challenges for water purification. **Environmental Science and Pollution Research**, 31(26), 37877-37906. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33679-y>

Yadegari, M., Ahmad Panahi, H., Rahmati, S. H., Mohammadi, A., & Imani, F. (2024). Poly(allyl alcohol-co-vinyl acetate)-grafted concrete waste for adsorptive removal of As(III). **Materials Chemistry and Physics**, 326. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129826>

Zango, U. U., Sharma, A., Pahil, V., Sharma, A. K., Yadav, M., & Kumar, R. (2025). Lead (Pb) bioremediation strategy from effluents and soil samples by the use of a microbial consortium along with agricultural residues. **Bioremediation Journal**. Scopus. <https://doi.org/10.1080/10889868.2025.2507430>

Zanoni, M. G., Majone, B., & Bellin, A. (2022). A catchment-scale model of river water quality by Machine Learning. **Science of the Total Environment**, 838. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156377>

Zoroufchi Benis, K., Motalebi Damuchali, A., McPhedran, K. N., & Soltan, J. (2020). Treatment of aqueous arsenic – A review of biosorbent preparation methods. **Journal of Environmental Management**, 273. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111126>