Otimização do residual de alumínio em uma solução alternativa coletiva simplificada de tratamento (SALTA-z): um estudo em escala de bancada

Optimization of aluminum waste in a simplified collective alternative treatment solution (SALTA-Z): a bench-scale study

Data de entrada: 02/04/2024
Data de aprovação: 05/09/2025

Whelton Brito dos Santos[1]* | Vera Lucia Antunes de Lima[2] | Weruska Brasileiro Ferreira[3] DOI: https://doi.org/10.36659/dae.2026.118

Santos WB https://orcid.org/0000-0002-2956-8260
Lima VLA https://orcid.org/0000-0001-7495-6935
Ferreira WB https://orcid.org/0000-0003-2381-3883

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o residual de alumínio na água tratada, para abastecimento humano, pelo sistema de tratamento de água alternativo coletivo e simplificado (SALTA-z), com emprego do coagulante sulfato de alumínio. O sistema foi reproduzido em escala de bancada. Empregou-se a metodologia da superfície de resposta (MSR) por meio do delineamento Box-Behnken (BBD) para otimizar os parâmetros operacionais: dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante, frente ao residual de alumínio na água. Percebeu-se que a maior remoção ocorreu na etapa de desinfecção/filtração. Com a função desejabilidade, estimou-se que a condição operacional da SALTA-z que confere menor residual de alumínio (0,053 $mg.L^{-1}$) à água tratada é: dosagem de coagulante de 45 $mg.L^{-1}$, tempo de sedimentação de 10 min e dosagem de desinfetante de 3 $mg.L^{-1}$. Assim, a tecnologia SALTA-z, em condições de operação ideais, é capaz de fornecer água segura aos consumidores.

Palavras-chave: Saneamento rural. Otimização. Clarificação. Coagulante. Sulfato de alumínio.

Abstract

This study aimed to evaluate the aluminum residue in water to supply humans that is treated by a simplified collective alternative water treatment solution (SALTA-z) using an aluminum sulfate coagulant. The system was reproduced in bench scale. The response surface methodology was used in a Box-Behnken design to optimize the following operational parameters: coagulant dosage, settling time, and disinfectant dosage against the aluminum residue in the water. The greatest aluminum removal occurred in the disinfection/filtration step. The desirability function estimated that the operational condition of SALTA-z that grants the lowest residual aluminum (0.053 mg.L-1) to the treated water is: coagulant dosage of 45 mg.L-1, sedimentation time of 10 min, and disinfectant dosage of 3 mg.L-1. Thus, it seems that the SALTA-z technology can provide safe water to consumers under ideal conditions.

Keywords: *Rural sanitation. Optimization. Clarification. Coagulant. Aluminum sulfate.*

[1] Universidade Estadual da Paraíba – Campina Grande – Paraíba – Brasil.
[2] Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande – Paraíba – Brasil.
[3] Universidade Estadual da Paraíba – Campina Grande – Paraíba – Brasil.
* **Autor correspondente:** wheltonbrt@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

O acesso à água potável é um direito humano, porém, em áreas isoladas ou em comunidades rurais é comprometido por fatores como baixa disponibilidade hídrica e inexistência de infraestrutura de tratamento e distribuição da água. Esse acesso deve ser fisicamente, geograficamente e financeiramente viável, e a água deve ser segura, aceitável e estar disponível em quantidade suficiente para uso pessoal e doméstico (Queiroz; Silva; Heller, 2020).

No Brasil, em 2019, foi criado o Programa Saneamento Brasil Rural (PSBR), coordenado pela Fundação Nacional de Saúde (Funasa), com a finalidade de articular e incrementar as ações que visem à universalização do acesso ao saneamento básico em áreas rurais e comunidades tradicionais. Com isso, é imprescindível o planejamento para esses setores baseado na execução de medidas estruturais e de obras de infraestrutura para expansão do acesso à água, sendo necessário o desenvolvimento de alternativas que promovam o fornecimento de água segura em consonância aos padrões físicos, químicos, radiológicos, organolépticos e microbiológicos estabelecidos pela Portaria GM/MS n° 888, de 4 de maio de 2021 (Brasil, 2021).

Nessa perspectiva, a Funasa conta com a solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água (SALTA-z), uma tecnologia social que realiza o tratamento das águas superficiais e subterrâneas por meio de processos convencionais como a coagulação, floculação, desinfecção e filtração, apresentando como meio filtrante uma camada suporte de areia e zeólita. Assim, a SALTA-z atua como um tipo de solução de abastecimento para áreas que não contam com abastecimento público tradicional (Funasa, 2017). No entanto, essa solução utiliza, no processo de tratamento, produtos químicos como agente coagulante e desinfetante, que uma vez utilizados de forma empírica podem promover riscos à saúde dos usuários.

Como agente coagulante, tem-se o sulfato de alumínio, que pela sua performance na remoção de sólidos em suspensão e pelo baixo custo de aquisição é amplamente utilizado no Brasil para o tratamento de água de abastecimento público (Lemos; Aguiar Filho; Cavallini, 2020). Porém, durante o processo de tratamento de água, além de produzir elevado volume de lodo com baixa degradabilidade e contribuir para turvação no final do tratamento, esse produto confere à água tratada um residual de alumínio que pode contribuir para o desenvolvimento de doenças neurodegenerativas, como as de Parkinson e Alzheimer (Balbinoti *et al.*, 2018; Nam *et al.*, 2013; Rosalino, 2011).

Estudos evidenciam preocupação quanto à presença de alumínio em produtos para consumo humano. Por estar presente em diversos processos e produtos, esse elemento torna-se amplamente disponível ao consumidor. O alumínio ingerido por meio de alimentos e em especial o contido na água requer atenção, uma vez que pode ser mais facilmente absorvido pelo trato gastrointestinal (Rosalino, 2011; Queiroz *et al.*, 2016).

Nessa perspectiva, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o residual de alumínio na água tratada pelo sistema SALTA-z, em escala de bancada, com o emprego do sulfato de alumínio, além de verificar o efeito dos parâmetros operacionais do sistema: dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante sobre a concentração residual de alumínio na água.

2 METODOLOGIA

2.1 A SALTA-z

Na SALTA-z, apresentada na Figura 1, a clarificação da água (coagulação/floculação/decantação) inicia-se pelo recalque da água bruta (1) que arrasta o coagulante presente no dosador (2) para

o reservatório superior (3), no qual ocorrerá o processo de floculação e sedimentação dos flocos formados. A fim de promover melhor dispersão do coagulante e homogeneização da água há uma curva instalada na entrada da tubulação de recalque no reservatório. O processo de sedimentação dos flocos é iniciado quando o reservatório atinge o nível máximo e, em consequência, tem-se a interrupção do recalque de água.

Após a sedimentação dos flocos, a camada de lodo formada é drenada por tubulação localizada no fundo do reservatório (4) para uma caixa de retenção do lodo, contendo areia. O descarte é realizado até ser observado pelo operador a mudança da coloração do efluente. Após a execução da drenagem do lodo, a água clarificada é liberada pela tubulação de saída e segue para o dosador de cloro (6), por fim, é filtrada (7) obtendo-se a água tratada (8).

O meio filtrante do sistema de filtração da SALTA-z é composto por areia (0,3 m atuando como camada suporte) e um leito filtrante de zeólita clinoptilolita (1,0 m). O filtro apresenta uma taxa de filtração de 360 $m^3.m^{-2}.dia^{-1}$ (Funasa, 2017).

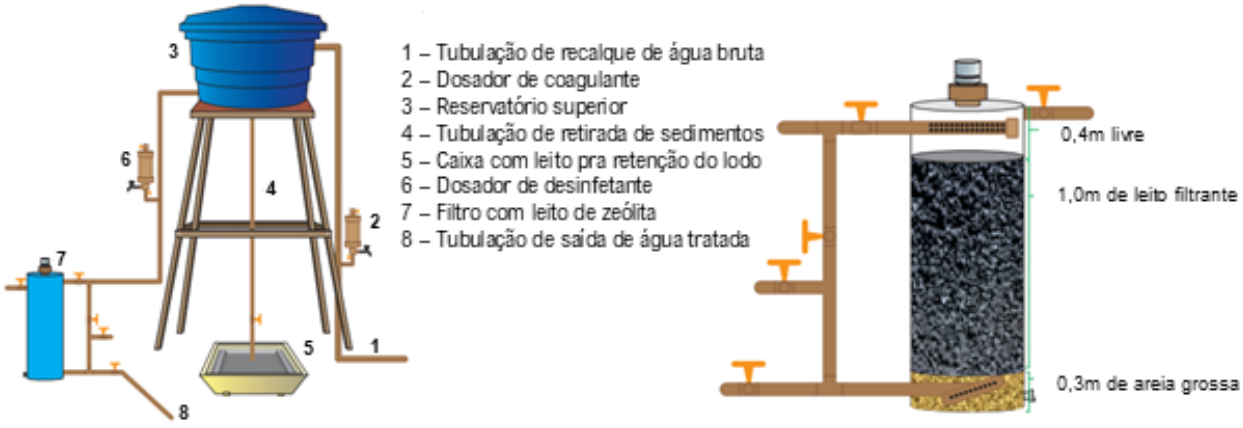

Figura 1 – Esquema do SALTA-z e detalhamento do filtro.

Fonte: Adaptado de Funasa (2017).

2.2 Procedimento experimental

A avaliação da eficiência da SALTA-z foi realizada em escala de bancada levando em consideração as características do sistema real. A etapa de clarificação foi reproduzida em equipamento Jar Test (com seis jarros de dois litros) e a etapa de filtração por filtro padrão contento zeólita do tipo clinoptilolita e areia grossa, mantendo-se a mesma taxa de filtração (360 $m^3.m^{-2}.dia^{-1}$). A Figura 2 ilustra o sistema em escala de bancada utilizado nesse trabalho.

A clarificação em equipamento Jar Test (Figura 2A) levou em consideração a recomendação do manual de solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água para consumo humano em pequenas comunidades, utilizando filtro e dosador desenvolvidos pela Funasa/Superintendência Estadual do Pará (Funasa, 2017), sendo os critérios:

1. velocidade de agitação de 100 rpm por 1 minuto para o processo de coagulação;
2. velocidade de agitação de 50 rpm por 10 minutos para a etapa de floculação; e
3. interrupção da mistura (0 rpm) para a etapa de decantação, a fim de promover a sedimentação dos flocos (os tempos de sedimentação avaliados constam na Tabela 1).

Após o término de cada ensaio de clarificação, coletou-se um litro de água decantada de cada jarro. Neles adicionou-se diferentes dosagens (Tabela 1) do agente desinfetante (Figura 2B), hipoclorito de cálcio, e de imediato procedeu-se a filtração (Figura 2C) e posterior determinação do residual de alumínio pelo método eriocromo cianina R (2500-Al B) descrito no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association – APHA; American Water Works Association – AWWA; Water Environment Federation – WPCF, 2012), bem como o controle da turbidez (Turbidímetro portátil – PoliControl AP2000) e do pH (pHmetro portátil – KASVI).

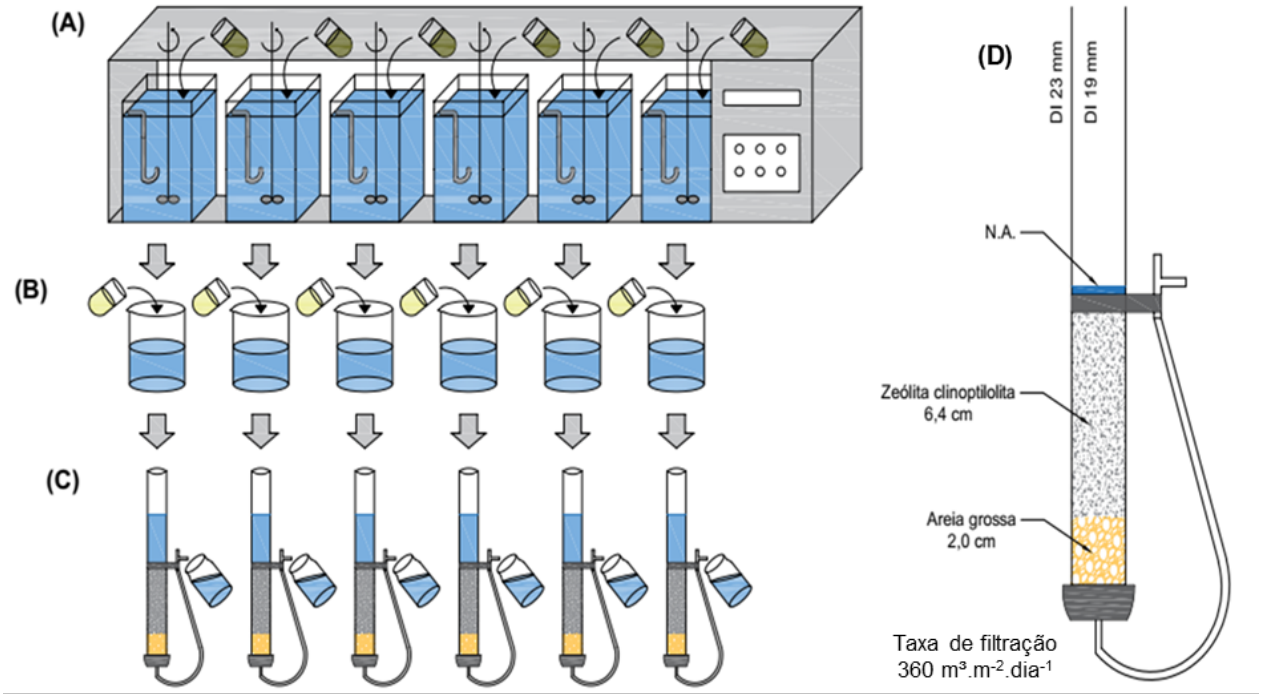

Figura 2 – Desenho esquemático do sistema experimental.

Para o filtro padrão de laboratório (Figura 2D), a composição do meio filtrante foi mantida com a proporção do filtro sistema real (1,0 m de zeólita e 0,3 m de areia), preenchendo-o com 6,4 cm de zeólita e 2,0 cm de areia grossa para um diâmetro interno de 19 mm.

Os ensaios foram realizados com água bruta proveniente do reservatório Epitácio Pessoa, localizado no município de Boqueirão, Paraíba, cujos principais usos estão relacionados à irrigação e ao abastecimento humano. A coleta foi realizada na Estação de Tratamento de Água de Gravatá, localizada no município de Queimadas, Paraíba. Essa água apresentou as seguintes características: turbidez de 2,06 uT, cor aparente de 23,10 uH, cor verdadeira de 14,65 uH, pH 8,0, alcalinidade e dureza de 109,0 e 96,0 mg$CaCO_3$.L^{-1}, respectivamente.

2.3 Delineamento experimental e análise dos dados

Para avaliar e otimizar condições operacionais da SALTA-z frente ao residual de alumínio da água tratada (variável dependente), foi aplicado a metodologia de superfície de resposta (MSR) por

meio do delineamento Box-Behnken (BBD). Assim sendo, considerou-se como variáveis independentes aquelas que interferem na eficiência do sistema e que são manipuladas pelos operadores do SALTA-z: a dosagem do coagulante (X_1), tempo de sedimentação (X_2) e dosagem do desinfetante (X_3). Os valores codificados e não codificados das variáveis independentes estão expressos na Tabela 1, estabelecidos por ensaios preliminares em laboratório em relação à remoção de cor e turbidez.

Tabela 1 – Fatores e níveis do delineamento Box-Behnken.

Variáveis	Símbolo	Níveis		
		-1	0	+1
Dosagem do coagulante ($mg.L^{-1}$)	X_1	15	30	45
Tempo de sedimentação (min)	X_2	10	20	30
Dosagem do desinfetante ($mg.L^{-1}$)	X_3	2	4	6

O BBD gerou a matriz de experimentos (Tabela 6), com 15 ensaios de tratabilidade, sendo realizados em duplicata, somando 30 ensaios. A matriz foi gerada a partir de três fatores (dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante) e três repetições no ponto central.

A relação entre as variáveis independentes e o residual de alumínio (variável dependente) foi verificada a partir da metodologia de superfície de resposta (MSR) por meio do ajuste de um modelo de regressão de segunda ordem. A significância do modelo bem como a falta de ajuste foi verificada a partir de análise de variância (ANOVA). A função desejabilidade foi utilizada para estimar as condições ótimas das variáveis independentes na minimização do residual de alumínio da água tratada. As análises foram realizadas por meio do Statistica® 10.0 (Statsoft, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados de residual de alumínio para os ensaios de tratabilidade na SALTA-z em escala de bancada. Observa-se que as maiores concentrações médias de alumínio na água tratada ocorreram nos ensaios 5, 7, 11, 14 e 15, com valores acima do máximo permitido pela Portaria GM/MS n° 888/2021 de 0,2 $mg.L^{-1}$. Percebe-se que, para os referidos ensaios, usou-se dosagens de sulfato de alumínio inferior ou igual a 30 $mg.L^{-1}$, tempo de sedimentação menores ou iguais a 20 min e dosagens de desinfetante acima de 4 $mg.L^{-1}$, exceto o ensaio 5 que utilizou a dosagem de 2 mgL^{-1}.

Tabela 2 – Matriz de BBD com variáveis codificadas e decodificadas e os valores médios de residual de alumínio ($mg.L^{-1}$) para água tratada com sulfato de alumínio.

Ensaio	X_1 Dosagem de coagulante ($mg.L^{-1}$)		X_2 Tempo de sedimentação (min)		X_3 Dosagem de desinfetante ($mg.L^{-1}$)		Residual de alumínio ($mg.L^{-1}$)		
1	**-1**	15	**-1**	10	**0**	4	0,14	±	0,01
2	**1**	45	**-1**	10	**0**	4	0,05	±	0,00
3	**-1**	15	**1**	30	**0**	4	0,20	±	0,00
4	**1**	45	**1**	30	**0**	4	0,08	±	0,00
5	**-1**	15	**0**	20	**-1**	2	0,28	±	0,02
6	**1**	45	**0**	20	**-1**	2	0,11	±	0,00
7	**-1**	15	**0**	20	**1**	6	0,29	±	0,02
8	**1**	45	**0**	20	**1**	6	0,19	±	0,08
9	**0**	30	**-1**	10	**-1**	2	0,18	±	0,04
10	**0**	30	**1**	30	**-1**	2	0,17	±	0,03

Tabela 2 – Continuação...

Ensaio	X_1 Dosagem de coagulante ($mg.L^{-1}$)		X_2 Tempo de sedimentação (min)		X_3 Dosagem de desinfetante ($mg.L^{-1}$)		Residual de alumínio ($mg.L^{-1}$)		
11	**0**	30	**-1**	10	**1**	6	0,21	±	0,06
12	**0**	30	**1**	30	**1**	6	0,18	±	0,01
13	**0**	30	**0**	20	**0**	4	0,18	±	0,01
14	**0**	30	**0**	20	**0**	4	0,20	±	0,01
15	**0**	30	**0**	20	**0**	4	0,21	±	0,01

Durante a execução dos testes foi realizado o monitoramento do residual de alumínio após a etapa de clarificação (pós-Jar Test), a fim de avaliar a eficiência das etapas posteriores (desinfecção e filtração). A Figura 3 apresenta a variabilidade dos dados do monitoramento do residual de alumínio na água clarificada e na água tratada nas diferentes condições.

De acordo com a Figura 3, observa-se diferença entre as etapas, com variações de 0,36 a 0,63 $mg.L^{-1}$ para a água clarificada e 0,05 e 0,31 $mg.L^{-1}$ para a água tratada. A atenuação do residual entre as etapas é devido à retenção do alumínio na unidade de filtração (Wen-dong *et al.*, 2007), bem como o processo de oxidação/desinfecção do alumínio na água, que pode variar entre 0 e 20% (Srinivasan; Viraraghavan; Subramanian, 1999).

A Figura 4 apresenta o gráfico de Pareto, mostrando os efeitos principais e as interações que exerceram influência no residual de alumínio com nível de confiança de 95% (p=0,05).

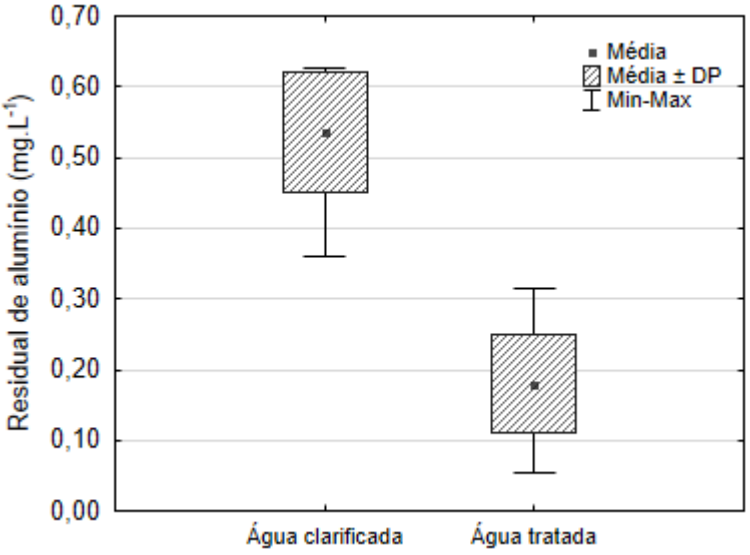

Figura 3 – Variabilidade dos dados de residual de alumínio na água clarificada e tratada.

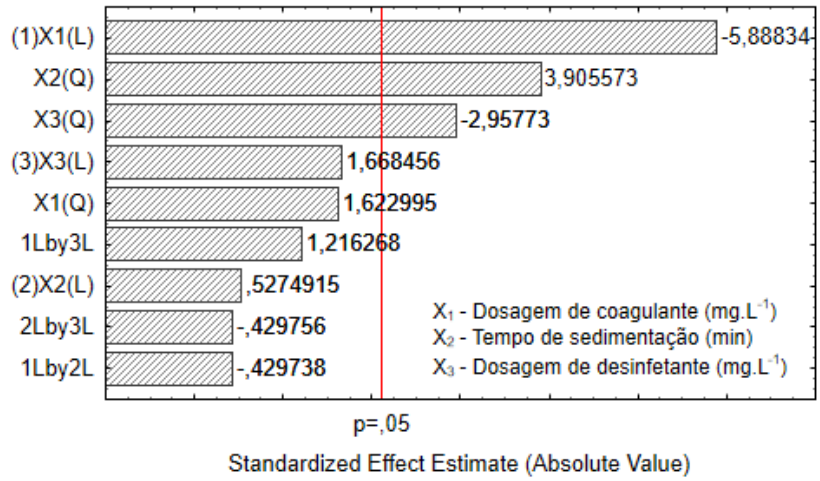

Figura 4 – Gráficos de Pareto dos efeitos padronizados sob o residual de alumínio em função dos fatores avaliados.

Conforme a Figura 4, verificou-se que as três variáveis independentes contribuíram de forma estatisticamente significativa em termos lineares e quadráticos para a presença de residual de alumínio na água. Porém, a dosagem de coagulantes (X_1) em termo linear se destacou em relação às demais variáveis como a de maior efeito, influenciou de forma inversa, quanto maior os seus níveis, menor o residual de alumínio conferido à água tratada. O tempo de sedimentação, em termos quadráticos (X_2^2), indicou a necessidade da adoção de menores valores para se ter a minimização do residual. Por seu turno, em termo quadrático, a dosagem de desinfetante (X_3^2) influenciou de forma negativa a concentração de alumínio.

O modelo de segunda ordem ajustado aos dados experimentais para o residual de alumínio na água tratada é apresentado na Equação 1. A Tabela 3 apresenta a análise de variância para verificar a qualidade do ajuste do modelo aos dados.

$$Y = 0{,}1422 + 0{,}0009X_1 - 0{,}0001X_1^2 + 0{,}0257X_2 - 0{,}0005X_2^2 - 0{,}0889X_3 + 0{,}0107X_3^2 - 0{,}00004X_1X_2 + 0{,}0005X_1X_3 - 0{,}0003X_2X_3 \quad (1)$$

Em que Y é a concentração de alumínio na água tratada (mg.L^{-1}), X_1, X_2 e X_3 representam, respectivamente, a dosagem de coagulante (mg.L^{-1}), o tempo de sedimentação (min) e a dosagem de desinfetante (mg.L^{-1}).

Tabela 3 – Análise de variância para o modelo quadrático ajustado.

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F_{tab}	F_{cal}	F_{cal}/F_{tab}
Regressão	0,1066	9	0,0118	2,39	7,18	3,00
Resíduos	0,0330	20	0,0016			
Falta de ajuste	0,0063	3	0,0021	3,20	1,34	0,42
Erro puro	0,0267	17	0,0016			
Total	0,1396	29				
R^2	0,76					
R^2ajustado	0,66					
R^2 máxima	80,90					
S (erro padrão de regressão)	0,0406					

Conforme expresso na Tabela 3, o modelo foi considerado significativo, uma vez que a regressão apresentou F_{calc} maior que F_{tab} ($F_{cal}/F_{tab} > 1$) e não apresentou falta de ajuste, F_{calc} menor que F_{tab} ($F_{cal}/F_{tab} < 1$), tornando-o preditivo, conforme relatado por Barros Neto; Scarminio; Bruns (2007). Além disso, o modelo é capaz de explicar 76% (R^2=0,76) da variação do residual de alumínio na água tratada. Segundo Barros Neto; Scarminio; Bruns (2007), modelos com R^2 menor que 0,60 não podem ser usados para fins preditivos, apenas como indicadores de tendência.

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam os gráficos de superfície de resposta e de contornos correlacionando as variáveis independentes com o residual de alumínio presente na água tratada pela SALTA-z em escala de bancada.

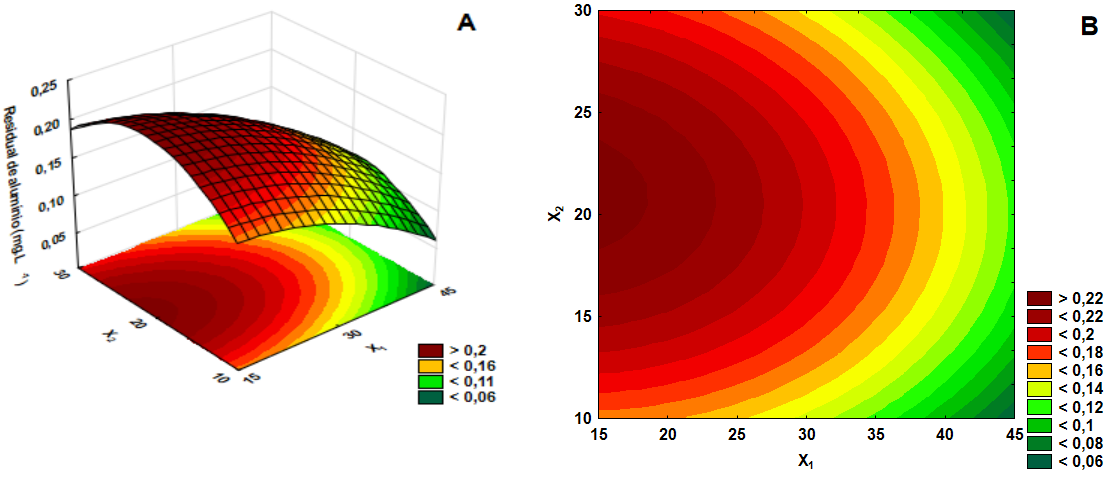

Figura 5 – Superfície de resposta (A) e curva de contorno (B) das variáveis dosagem de coagulante (X_1) e tempo de sedimentação (X_2). A variável dosagem de desinfetante foi mantida constante (X_3 = 4,0 mg.L^{-1}).

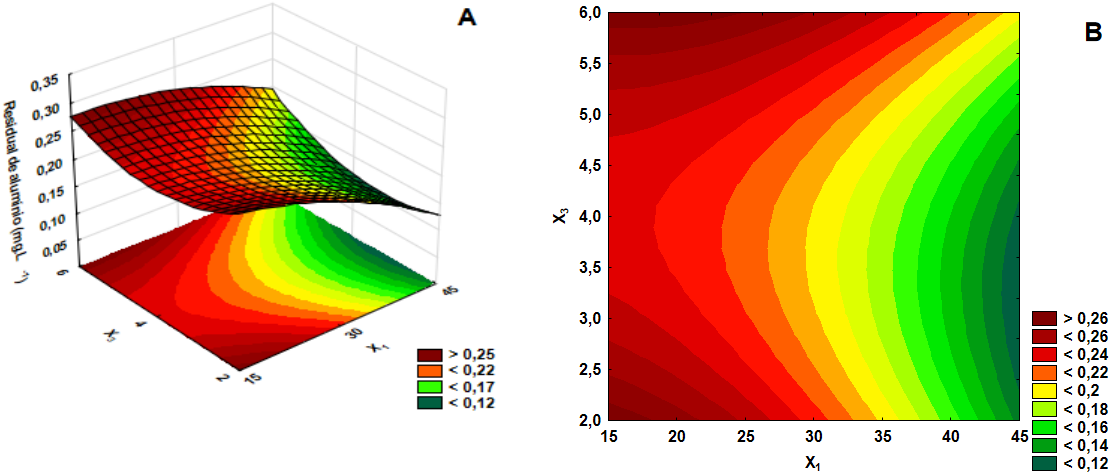

Figura 6 – Superfície de resposta (A) e curva de contorno (B) das variáveis dosagem de coagulante (X_1) e dosagem de desinfetante (X_3). A variável tempo de sedimentação foi mantida constante (X_3 = 20 min).

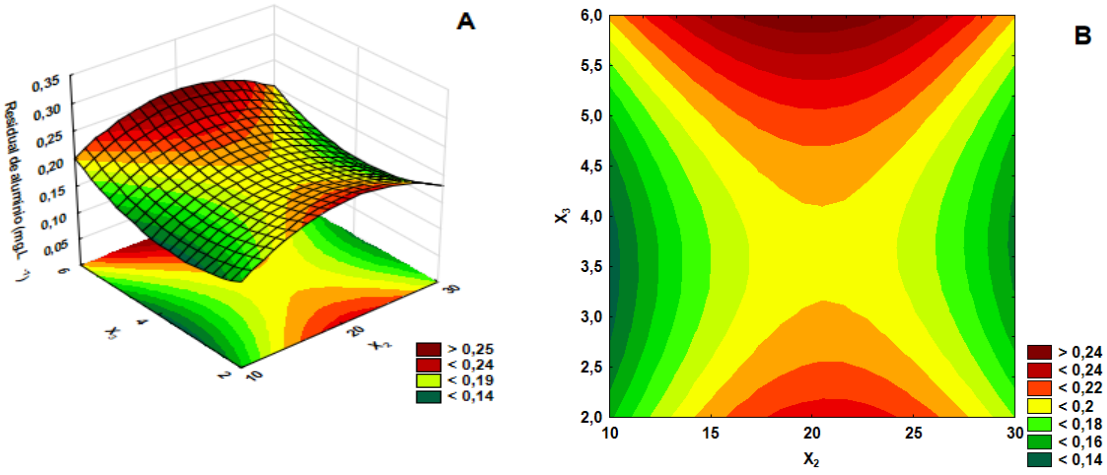

Figura 7 – Superfície de resposta (A) e curva de contorno (B) das variáveis tempo de sedimentação (X_2) e dosagem de desinfetante (X_3). A variável dosagem de coagulante foi mantida constante (X_1 = 15,0 mg.L^{-1}).

Ao confrontar a dosagem de coagulantes (X_1) e do tempo de sedimentação (X_2) – Figura 5 – é possível identificar que o residual de alumínio na água tratada tende a ficar dentro do limite aceitável para consumo humano de 0,2 mg.L^{-1}, quando adotadas maiores dosagens (> 30 mg.L^{-1}) em amplo tempo de sedimentação (10 a 30 min).

Na Figura 6, que correlaciona a dosagem de coagulante (X_1) e a dosagem de desinfetante (X_3), notou-se que o residual de alumínio tende a diminuir com doses de coagulante acima de 30 mg.L^{-1} em ampla faixa de dosagem de desinfetante. No entanto, as menores concentrações de alumínio (< 0,14 mg.L^{-1}) foram observados na faixa de dosagem do desinfetante entre 2 e 4 mg.L^{-1}.

Por seu turno, ao analisar a Figura 7, que correlaciona o tempo de sedimentação (X_2) e da dosagem de desinfetante (X_3) sob o residual de alumínio na água, observou-se que as concentrações de alumínio tendem a serem superiores ao valor máximo permitido de 0,2 mg.L^{-1}, quando adotado tempos de sedimentação próximos ao valor central, de 20 min, e em dosagens próximas a 2,0 mg.L^{-1} e superiores a 4,0 mg.L^{-1}.

Por fim, a partir do modelo proposto foi possível determinar os valores ótimos para as três variáveis operacionais estudadas para a minimização das concentrações de alumínio a partir da função desejabilidade. A Figura 8 ilustra o perfil dos valores preditos das variáveis dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante da SALTA-z em escala de bancada.

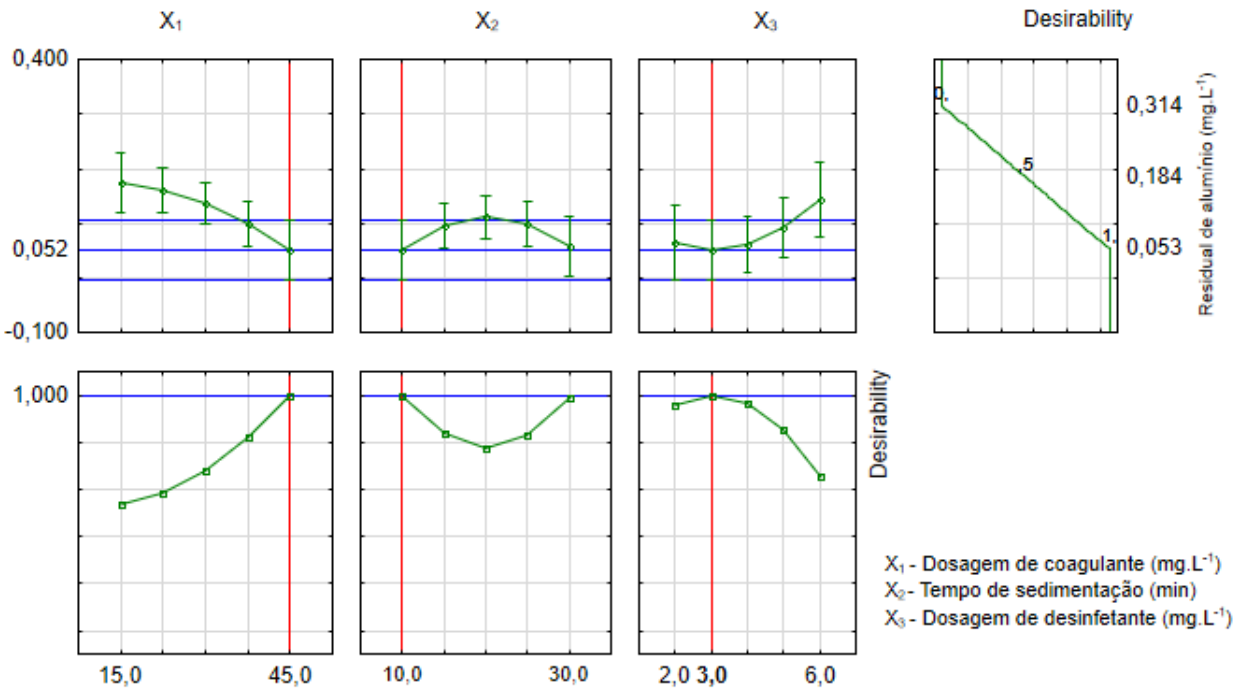

Figura 8 – Perfil dos valores preditos e da desejabilidade para os experimentos utilizando o sulfato de alumínio como agente coagulante.

A condição operacional que oferece o menor residual de alumínio à água tratada pelo sistema é uma dosagem de 45,0 mg.L^{-1}, tempo de sedimentação de 10 min e dosagem de desinfetante de 3,0 mg.L^{-1}, fornecendo um residual de 0,053 mg.L^{-1}.

Diante dos resultados obtidos nesse estudo de otimização, pode-se inferir que a dosagem do agente coagulante para se obter o menor residual de alumínio se apresentou próximo ao ponto máximo estudado. Nesse caso, a água bruta apresentou baixos valores de turbidez e cor, indicando que a concentração de coloides é relativamente baixa e com dosagens mais elevadas de sulfato de alumínio, atuando em sua faixa de pH ótimo (o pH observado nos experimentos foi de ±6,4), teve-se efetividade na desestabilização das partículas sendo removidas pelo processo de sedimentação e as remanescentes foram retidas na filtração. Esse fato pode ser observado no comportamento da turbidez da água decantada e tratada, Figura 9a, cuja turbidez residual tende a ser menor com dosagens de coagulante de 45 mg.L^{-1}.

No entanto, o residual de alumínio foi minimizado quando adotado o menor tempo de sedimentação. Quando comparado os valores de turbidez residual entre as etapas de clarificação e pós-filtração (água tratada) em relação aos tempos de sedimentação, Figura 9b, percebe-se que a turbidez na água clarificada para o tempo de 10 min é superior aos tempos de 20 e 30 minutos, no entanto, não há diferença significativa na água tratada. Assim, pode-se inferir que a remoção do alumínio residual foi potencializada quando os flocos formados apresentavam uma menor velocidade de sedimentação, permanecendo na água e retidas na etapa de filtração.

Estudos realizados por Srinivasan e Viraraghavan (2002) e Liu, Liu e Xie (2020) relataram que as unidades de clarificação e filtração removeram com eficácia as partículas de alumínio. Além disso, o

estudo realizado por Liu, Liu e Xie (2020) em uma estação de tratamento de água em Jiaxing, China, observou correlação positiva entre a concentração de alumínio residual e a turbidez na água tratada, cujo tratamento físico, no caso a filtração, apresentam remoções de alumínio mais elevadas.

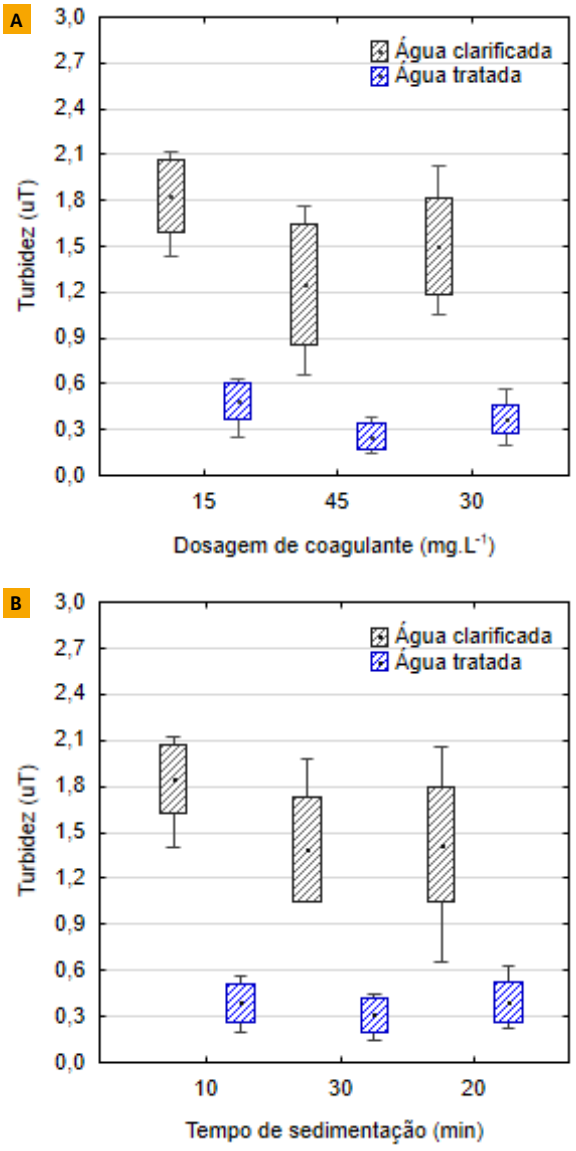

Figura 9 – Variabilidade dos dados de turbidez, categorizados pela dosagem de coagulante (a) e pelo tempo de sedimentação (b).

A dosagem de desinfetante ótima obtida para promover a minimização do residual de alumínio encontrada foi de 3,0 mg.L^{-1}, valor intermediário entre o mínimo e máximo estudado. No entanto, como relatado anteriormente, a remoção de alumínio na água pelos processos de oxidação/desinfecção é baixa, podendo variar entre 0 e 20% (Srinivasan; Viraraghavan; Subramanian, 1999).

4 CONCLUSÕES

A partir dos experimentos realizados na SALTA-z em escala de bancada, foi possível verificar que a água tratada com sulfato de alumínio apresentou, em alguns momentos, residual de alumínio superior ao permitido pela Portaria GM/MS n° 888/2021, o que pode gerar prejuízos à saúde humana. Com isso, constatou-se a necessidade de otimização dos parâmetros operacionais de dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante, que demonstraram influência direta na concentração de alumínio na água tratada. Com base no modelo proposto, foi estabelecida a condição ótima de operação da SALTA-z, que possibilita a obtenção de água tratada com um residual de alumínio em torno de 73,5% abaixo do limite permitido pela referida Portaria de potabilidade, com valor de 0,053 mg.L^{-1}. Desse modo, pode-se atestar que a tecnologia SALTA-z, em escala de bancada, foi capaz de produzir uma água segura para seus usuários no tocante ao residual de alumínio, se solidificando como alternativa para a universalização do saneamento em comunidades rurais e/ou difusas.

Ressalta-se que, apesar dos resultados satisfatórios, a água bruta utilizada nos ensaios, proveniente do reservatório Epitácio Pessoa, apresentou baixa turbidez e cor. Assim, as dosagens de coagulante e os parâmetros operacionais otimizados podem não ser diretamente aplicáveis a águas mais poluídas, com maior concentração de sólidos suspensos, matéria orgânica natural ou cor elevada, necessitando de estudos complementares.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Santos WB, Ferreira WB e Lima VLA; **Metodologia:** Santos WB, Ferreira WB e Lima VLA; **Investigação:** Santos WB; **Redação, Revisão e Edição:** Santos WB, Ferreira WB e Lima VLA; **Recursos:** Ferreira WB.

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA; WATER ENVIRONMENT FEDERATION – WPCF. **Standard Methods for the Examinaton of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington, DC: APHA, 2012.

BALBINOTI, J. R. *et al*. Uso de sementes de Moringa oleifera como agente coagulante para o tratamento de água. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 11, n. 5, p. 1748-1760, 2018. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.5.p1748-1760.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 3. ed. Campinas: UNICAMP, 2007.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS n. 888, de 04 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n. 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**: seção 1, Brasília, DF, p. 127, 7 maio 2021.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE – FUNASA. **Manual da solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água para consumo humano em pequenas comunidades utilizando filtro e dosador desenvolvidos pela Funasa/ Superintendência Estadual do Pará**. Brasilia, DF: Funasa, 2017.

LEMOS, K. S.; AGUIAR FILHO, S. Q.; CAVALLINI, G. S. Avaliação comparativa entre os coagulantes sulfato de alumínio ferroso e policloreto de alumínio para tratamento de água: estudo de viabilidade econômica. **Revista desafios**, Palmas, v. 7, n. 1, p. 109-119, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.20873/uftv7-7824.

LIU, H.; LIU, H.; XIE, Y. Fate and fractionation of aluminum in a full-scale Al-based drinking water treatment plant. **Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA**, London, v. 69, n. 5, p. 469-477, 2020. DOI: https://doi.org/10.2166/aqua.2020.005.

NAM, S. *et al*.. Streaming current titration for coagulation of high turbidity water. **Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 419, p. 133-139, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.11.051.

QUEIROZ, J. T. M.; SILVA, P. N.; HELLER, L. Novos pressupostos para o saneamento no controle de arboviroses no Brasil. **Caderno de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 5, p. 1-5, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0102-311X00223719.

QUEIROZ, S. C. B. *et al*.. Remoção de alumínio em águas para abastecimento público por meio de precipitação química com hidróxido de cálcio. **Revista AIDIS de Engenharia e Ciências Ambientais**, Cidade do México, v. 9, n. 1, p. 89-106, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2016.9.1.50062.

ROSALINO, M. R. R. **Potenciais efeitos da presença de alumínio na água de consumo humano**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

SRINIVASAN, P.; VIRARAGHAVAN, T. Characterisation and concentration profile of aluminium during drinking-water treatment. **Water SA**, [*s. l.*], v. 28, n. 1, p. 99-106, 2002. DOI: http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v28i1.4873

SRINIVASAN, P. T.; VIRARAGHAVAN, T.; SUBRAMANIAN, K. S. Aluminium in drinking water: An overview. **Water SA**, [*s. l.*], v. 25, n. 1, p. 47-56, 1999. Disponível em: https://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/WaterSA_1999_01_jan99_p47.pdf. Acesso em: 12 set. 2025.

STATSOFT. **STATISTICA** (data analysis software system). Fort Lauderdale: STATSOFT, 2011. Disponível em: www.statsoft.com. Acesso em: 12 set. 2025.

WEN-DONG, W. *et al*. Transfer and transport of aluminum in filtration unit. **Journal of Environmental Sciences**, Amsterdam, v. 19, n. 8, p. 897-901, 2007. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/s1001-0742(07)60149-1.