

Influência de fatores operacionais na eficiência de uma solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água

Influence of operational factors on the efficiency of a simplified collective alternative water treatment solution




• **Data de entrada:**
30/06/2021




• **Data de aprovação:**
26/12/2022

Whelton Brito dos Santos^{1*} | Thiago Santos de Almeida Lopes¹ | Amanda Laurentino Torquato¹ | Weruska Brasileiro Ferreira² | Vera Lúcia Antunes de Lima¹ | Celia Regina Diniz²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.064>

ORCID ID

Santos WB  <https://orcid.org/0000-0002-2956-8260>
Lopes TSA  <https://orcid.org/0000-0002-0270-6133>
Torquato A  <https://orcid.org/0000-0002-1079-1315>

Ferreira WB  <https://orcid.org/0000-0003-2381-3883>
Lima VLA  <https://orcid.org/0000-0001-7495-6935>
Diniz CR  <https://orcid.org/0000-0003-2905-6764>

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência dos fatores operacionais dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante na eficiência de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira de uma solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água (SALTA-z) usando coagulantes orgânico e inorgânico com águas de reservatório da região semiárida do Brasil. A SALTA-z foi adaptada à escala de bancada por equipamento jar test com filtro acoplado. Com o delineamento Box-Behnken associado à metodologia da superfície de resposta, foi possível verificar que a remoção da turbidez foi influenciada principalmente pela dosagem dos coagulantes e pelo tempo de sedimentação, enquanto o agente desinfetante atuou como oxidante, responsável pela remoção de cor aparente e verdadeira. Em relação à performance dos coagulantes, a remoção da turbidez foi mais efetiva ao usar o orgânico enquanto a remoção da cor aparente e verdadeira foi mais eficiente ao usar o coagulante inorgânico.

Palavras-chave: SALTA-z. Coagulante orgânico. Coagulante inorgânico. Saneamento rural. Acesso à água. Delineamento Box-Behnken. Metodologia da superfície de resposta.

Abstract

The objective of this work was to evaluate the influence of operational factors coagulant dosage, sedimentation time and disinfectant dosage on the turbidity removal efficiency, apparent and true color of a simplified collective alternative water treatment solution (SALTA-z) using organic and inorganic coagulants from reservoir waters in the semiarid region of Brazil. The SALTA-z was adapted to bench scale by jar test equipment with coupled filter. With the Box-Behnken design associated with the response surface methodology, it was possible to verify that the removal of turbidity was mainly influenced by the dosage of coagulants and the sedimentation time, while the disinfectant agent acted as an oxidizer, responsible for the removal of apparent and true color. Regarding the performance of the coagulants, the removal of turbidity was more effective when using organic coagulant, while apparent and true color removal was more effective when using inorganic coagulant.

Keywords: SALTA-z. Organic coagulant. Inorganic coagulant. Rural sanitation. Access to water. Box-Behnken design. Response surface methodology.

¹ Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande - Paraíba - Brasil.

² Universidade Estadual da Paraíba - Campina Grande - Paraíba - Brasil.

* **Autor correspondente:** wheltonbrt@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Diversos desafios dificultam a implementação de ações voltadas ao saneamento básico em áreas rurais. O principal deles é o planejamento municipal, que enfoca predominantemente as áreas urbanas, o que acaba por deixar políticas ambientais e setoriais, especialmente na zona rural, sem a devida atenção (FERREIRA et al., 2019). Isso é evidenciado nos dados do último Censo Demográfico (2010), onde consta que cerca de 29% dos domicílios rurais brasileiros não possuem água encanada e 30% não possuem banheiro (IBGE, 2010; SILVA et al., 2019).

Nas regiões Norte e Nordeste, o percentual de domicílios sem água canalizada é ainda maior, chegando a 52 e 44%, respectivamente; nas demais regiões, tal valor é inferior a 15%. Essa diferença também é observada no tocante à quantidade de residências sem instalações hidrossanitárias, onde as regiões Norte e Nordeste apresentam valores superiores a 50%. Isso ressalta, além da precariedade em que vive uma parcela da população rural, as desigualdades no acesso às soluções adequadas de saneamento (IBGE, 2010; SILVA et al., 2019).

Esses fatores motivaram a Fundação Nacional da Saúde (Funasa) a criar o Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR), cujo objetivo é buscar soluções de saneamento básico mais próximas das diferentes realidades das comunidades rurais brasileiras (ROLAND et al., 2019).

Nesta conjuntura, surge a SALTA-z, uma solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água desenvolvida pela Funasa, que vem sendo utilizada como ferramenta efetiva na universalização do acesso à água segura em comunidades rurais e/ou difusas. Essa tecnologia propõe a potabilização da água por meio de técnicas convencionais de tratamento, cujo diferencial está no uso de zeólita como meio filtrante, material com capacidade adsorvente e de troca

iônica que vem sendo amplamente utilizado no tratamento de água e esgoto, apresentando alto desempenho na remoção de amônia, metais pesados, substâncias húmicas e corantes (KALLÓ, 2001; WANG; PENG, 2010).

No entanto, a SALTA-z ainda demanda estudos relacionados a operação, manutenção e utilização de produtos químicos, que podem ocasionar riscos à saúde dos usuários, bem como a avaliação da eficiência do tratamento em relação ao atendimento aos padrões de potabilidade por meio de pesquisa científica que ratifique os resultados obtidos pela própria Funasa com os sistemas já instalados em diversas comunidades rurais.

Os operadores do sistema controlam três fatores: a dosagem de coagulante, o tempo de residência ou sedimentação e a dosagem de desinfetante. A manipulação adequada desses parâmetros é essencial para o bom desempenho do sistema e, conseqüentemente, uma água tratada cuja qualidade atenda aos padrões de potabilidade.

Nesse tipo de sistema se deve ter uma atenção especial em relação ao uso de produtos químicos, como os agentes coagulantes. Entre estes, os de origem inorgânica, principalmente aqueles à base de alumínio, são os mais amplamente empregados. No entanto, alguns estudos indicaram que o alumínio residual proveniente desse uso pode ser uma causa importante da doença de Alzheimer, e diminuir a concentração desse residual é importante para garantir a qualidade da água (WANG et al., 2011; XU et al., 2014). O emprego de coagulantes orgânicos, de origem vegetal, a exemplo do coagulante à base de tanino *Acacia mearnsii*, é uma opção frente a essa problemática, por não possuir metais em sua composição.

Uma alternativa para avaliar o desempenho da SALTA-z e otimizar os parâmetros operacionais é a metodologia de superfície de respostas (MSR), que por meio de técnicas matemáticas e estatísticas proporciona a modelagem de processos

que demandam a análise de muitas variáveis e a influência destas na resposta de interesse, gerando resultados mais próximos da resposta desejável (BEZERRA et al., 2008; CALADO; MONTGOMERY, 2003; MONTGOMERY; RUNGER, 2009; TETTEH; RATHILAL; CHOLLOM, 2017).

2 OBJETIVOS

Avaliar a eficiência da SALTA-z, em escala de bancada, com o emprego de coagulante orgânico e inorgânico no tratamento de águas característica do semiárido brasileiro, proveniente do reservatório superficial Epitácio Pessoa, localizado no município de Boqueirão, Paraíba, bem como estudar os efeitos e interações das

variáveis operacionais: dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante para avaliar a remoção dos parâmetros de maior controle no tratamento de água para consumo humano, que são: turbidez, cor aparente e cor verdadeira.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 SALTA-z

A SALTA-z utiliza técnicas convencionais de tratamento de água: coagulação, floculação, decantação, desinfecção e filtração, reunidas em uma estrutura simplificada, conforme ilustrado na Fig. 1.



Figura 1 - Ilustração da SALTA-z em escala real e detalhamento do filtro

Fonte: adaptado de Funasa (2017).

A operação se dá da seguinte forma: a água bruta é recalçada (1) arrastando o coagulante presente no dosador (2) para o reservatório superior (3). Ao chegar no reservatório, a água é distribuída por meio de uma curva instalada para propiciar uma maior dispersão da massa líquida, o que resulta em uma melhor homogeneização entre o coagulante e a água bruta e floculação. Após completar o nível máximo do reservatório, o sistema de recalque é desligado e o processo de sedimentação dos flocos é iniciado. A camada de sedimento (lodo) formada é posteriormente drenada pela tubulação de descarga (4) para o leito de retenção de lodo (5). A descarga é reali-

zada até não ser observada a presença de lodo no efluente. Após o processo de clarificação (coagulação/floculação/decantação), a água é liberada para as etapas de desinfecção e filtração através da tubulação de saída, localizada 10 cm acima do fundo do reservatório para evitar o arraste de sedimentos. A água passa pelo dosador de cloro (6) realizando a desinfecção; por fim, passa pelo filtro (7), produzindo a água tratada (8).

O filtro da SALTA-z (Fig. 1) é composto por areia e zeólita clinoptilolita. Apresenta uma taxa de filtração de 360 m³.m⁻².dia⁻¹ com altura mínima de 1,0 m de zeólita e 0,3 m de camada suporte de areia (FUNASA, 2017).

3.2 Procedimento experimental

Com o intuito de avaliar e otimizar a SALTA-z, foram executados experimentos em escala de bancada, reproduzida por sistema padrão para ensaio de tratabilidade, composto por um equipamento jar test (jarros de dois litros), responsável por simular a etapa de clarificação, e filtro de bancada contendo meio filtrante composto por areia grossa e zeólita do tipo clinoptilolita, para simular a etapa de filtração.

A primeira etapa de tratamento, a clarificação, foi realizada conforme recomendado pelo 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 (FUNASA, 2017), que estabelece os seguintes critérios para a clarificação em jar test: (i) velocidade de agitação de 100 rpm por 1 minuto para o processo de coagulação; (ii) velocidade de agitação de 50 rpm por 10 minutos para a etapa de floculação; (iii) interrupção da mistura para a etapa de decantação, a fim de promover a sedimentação dos flocos durante os diferentes tempos avaliados pelo planejamento experimental (Tabela 1). Após cada ensaio de clarificação, foi coletado um litro da água decantada de cada jarro, adicionadas diferentes dosagens (Tabela 1) do agente desinfetante (hipoclorito de cálcio) e realizadas, imediatamente, as filtrações, sendo as águas filtradas coletadas e caracterizadas.

A composição do meio filtrante, realizada em filtro de bancada, 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, mantendo-se a mesma taxa de filtração.

A água bruta usada nos testes de tratabilidade foi obtida na estação de tratamento de água de Gravatá (ETA-Gravatá), situada no município de

Queimadas, Paraíba, que trata a água captada do reservatório superficial Epitácio Pessoa, localizado no município de Boqueirão, Paraíba, cujos usos principais estão relacionados à irrigação e abastecimento humano. A água bruta 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 mgCaCO₃.L⁻¹, respectivamente. Todas as determinações analíticas foram realizadas de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WPCF, 2012).

Os experimentos foram conduzidos com a aplicação de dois agentes coagulantes para comparação na eficiência do tratamento da água: o sulfato de alumínio (inorgânico) e o Tanfloc (orgânico). A escolha do sulfato de alumínio se deu por ser o agente coagulante mais empregado no tratamento de água. Já o Tanfloc, produto à base de tanino extraído da casca da *Acacia mearnsii*, foi escolhido por apresentar resultados satisfatórios na remoção de cor aparente e turbidez para as águas provenientes do mesmo reservatório utilizado neste estudo (SILVEIRA et al., 2019).

3.3 Metodologia de superfície de resposta

A metodologia da superfície de resposta (MSR), por meio de experimentos em delineamento Box-Behnken (DBB), foi aplicada com o intuito de determinar as condições ótimas de operação da SALTA-z. Os três fatores operacionais estudados foram: dosagem do coagulante (X1); tempo de sedimentação (X2) e dosagem de desinfetante (X3), definidos como variáveis independentes, para investigar a influência que exercem sobre a qualidade da água produzida. A Tabela 1 apresenta os valores codificados e não codificados dos níveis dos fatores selecionados, definidos por meio de ensaios preliminares em laboratório.

Tabela 1 - Fatores e níveis do delineamento Box-Behnken

Fatores (variáveis independentes)	Símbolo	Níveis		
		Inferior	Central	Superior
		-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

A partir do DBB, como foram selecionados 3 fatores (dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante) e 3 repetições no ponto central, resultando em 15 ensaios de tratabilidade (Tabelas 2 e 3), realizados em duplicata, o que resultou em 30 testes de tratabilidade para cada um dos experimentos (coagulante inorgânico e orgânico).

As variáveis resposta ou dependentes foram turbidez (Y₁), cor aparente (Y₂) e cor verdadeira (Y₃), expressos em termos de percentual de remoção (%). A relação entre as variáveis independentes e as variáveis respostas foi representada matematicamente por meio de modelos de regressão de segunda ordem. A análise de variância foi aplicada com o intuito de testar a adequação desses modelos. A estimativa das condições operacio-

nais ótimas se deu pela função de desejabilidade, que permite identificar simultaneamente as condições experimentais ideais para todas as variáveis testadas em um planejamento. A análise dos resultados de desejabilidade foi realizada com base na escala de Harrington (RIBARDO; ALLEN, 2003). Para todas as análises, foi utilizado o software Statistica® 10.0 (STATSOFT, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 2 e 3 apresentam, para os experimentos com coagulante inorgânico e orgânico, respectivamente, os valores de remoção de turbidez (Y₁), cor aparente (Y₁) e cor verdadeira (Y₃) obtidos para os ensaios de tratabilidade propostos pelo delineamento Box-Behnken.

Tabela 2 - Matriz de ensaios de tratabilidade obtidos por DBB para o experimento conduzido com coagulante inorgânico e seus resultados para as variáveis dependentes ou resposta

Ensaio	Variáveis independentes						Variáveis dependentes		
	X ₁ (mg.L ⁻¹)	X ₂ (min)	X ₃ (mg.L ⁻¹)	Y ₁ (%)	Y ₂ (%)	Y ₃ (%)			
E1	-1	15	-1	10	0	4	75,23 ± 1,61	68,66 ± 0,28	61,86 ± 3,85
E2	1	45	-1	10	0	4	89,78 ± 1,61	75,96 ± 1,09	59,95 ± 1,54
E3	-1	15	1	30	0	4	79,78 ± 0,32	68,18 ± 1,22	66,63 ± 1,73
E4	1	45	1	30	0	4	92,62 ± 1,45	80,39 ± 0,54	67,85 ± 0,00
E5	-1	15	0	20	-1	2	78,18 ± 0,33	60,10 ± 1,49	58,45 ± 2,12
E6	1	45	0	20	-1	2	89,21 ± 1,12	71,44 ± 0,68	63,90 ± 1,35
E7	-1	15	0	20	1	6	71,14 ± 0,00	64,91 ± 0,40	64,72 ± 2,51
E8	1	45	0	20	1	6	88,64 ± 1,61	78,27 ± 1,63	72,07 ± 2,88
E9	0	30	-1	10	-1	2	82,61 ± 1,77	63,66 ± 0,54	55,86 ± 3,08
E10	0	30	1	30	-1	2	84,32 ± 0,96	64,62 ± 0,81	63,49 ± 3,08
E11	0	30	-1	10	1	6	81,71 ± 1,12	67,41 ± 0,95	69,62 ± 4,04
E12	0	30	1	30	1	6	86,37 ± 0,32	75,48 ± 0,95	67,71 ± 2,88
E13	0	30	0	20	0	4	79,77 ± 1,29	70,58 ± 0,54	71,39 ± 1,54
E14	0	30	0	20	0	4	82,96 ± 1,28	71,06 ± 0,13	68,80 ± 1,34
E15	0	30	0	20	0	4	84,21 ± 3,37	71,06 ± 0,95	70,03 ± 2,31

Tabela 3 - Matriz de ensaios de tratabilidade obtidos por DBB para o experimento conduzido com coagulante orgânico e seus resultados para as variáveis dependentes ou resposta

Ensaio	Variáveis independentes						Variáveis dependentes		
	X ₁ (mg.L ⁻¹)	X ₂ (min)	X ₃ (mg.L ⁻¹)	Y ₁ (%)	Y ₂ (%)	Y ₃ (%)			
E1	-1	15	-1	10	0	4	84,97 ± 0,54	58,38 ± 0,36	34,45 ± 0,78
E2	1	45	-1	10	0	4	85,61 ± 1,82	65,73 ± 0,12	50,00 ± 0,00
E3	-1	15	1	30	0	4	85,86 ± 0,00	56,24 ± 0,72	38,34 ± 0,78
E4	1	45	1	30	0	4	93,44 ± 1,27	60,77 ± 0,85	45,42 ± 1,38
E5	-1	15	0	20	-1	2	85,73 ± 0,18	55,56 ± 1,69	45,00 ± 1,97
E6	1	45	0	20	-1	2	94,09 ± 1,09	65,82 ± 0,97	50,56 ± 0,00
E7	-1	15	0	20	1	6	86,25 ± 1,27	63,59 ± 0,96	45,70 ± 2,16
E8	1	45	0	20	1	6	93,58 ± 0,73	68,29 ± 0,37	55,14 ± 0,59
E9	0	30	-1	10	-1	2	92,68 ± 0,54	63,59 ± 1,20	46,25 ± 0,98
E10	0	30	1	30	-1	2	92,67 ± 0,18	59,06 ± 0,85	42,23 ± 2,35
E11	0	30	-1	10	1	6	91,39 ± 0,18	64,70 ± 1,33	49,72 ± 0,40
E12	0	30	1	30	1	6	91,39 ± 0,18	66,84 ± 1,21	49,59 ± 0,59
E13	0	30	0	20	0	4	94,09 ± 1,09	61,63 ± 0,36	49,17 ± 1,57
E14	0	30	0	20	0	4	93,32 ± 1,45	62,91 ± 0,49	51,53 ± 0,98
E15	0	30	0	20	0	4	92,16 ± 0,18	61,46 ± 0,12	50,56 ± 0,90

Foram observadas remoções entre 71,14-93,64% para a turbidez, 59,04-80,77% para cor aparente e 53,68-74,11% para cor verdadeira, para os testes conduzidos com o coagulante inorgânico, e 84,32-94,86% para a turbidez, 54,36-68,55% para cor aparente e 33,89-55,56% para cor verdadeira, nos ensaios com coagulante orgânico.

Sánchez-Martín, González-Velasco e Beltrán-Heredia (2009) obtiveram, em ensaios de coagulação/floculação com aplicação de 10 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio e Tanfloc (coagulante a base de *Acacia mearnsii*), remoções de turbidez de 82 e 97%, respectivamente. Por seu turno, Beltrán-Heredia, Sánchez-Martín e Dávila-Acedo (2011), em ensaios de clarificação com coagulante à base de extrato de tanino de *Acacia mearnsii* de Wild, NH₄Cl e formaldeído, obtiveram remoção de turbidez próxima a 100%.

Ao comparar diversos coagulantes (*Moringa oleifera*, Silvafloc, Tanfloc e sulfato de alumínio) na eficiência de clarificação da água, Sánchez-Martín, González-Velasco e Beltrán-Heredia (2010) observaram que os coagulantes naturais

apresentaram maior desempenho na remoção da turbidez com dosagens de 15 mg.L⁻¹. Bongiovani et al. (2016), com o emprego do Tanfloc, atingiram remoção de turbidez acima de 90% e de 80% para a cor aparente em ensaios de coagulação/floculação. Com a adição da filtração, alcançaram uma eficiência de 99±0,71% para ambos os parâmetros. Machado et al. (2020), com aplicação de coagulante produzido a partir da *Acacia mearnsii* sem o emprego da etapa de cationização (dispensa da reação de Mannich), apresentaram redução de 100% da turbidez e de 89,9% da cor da água. Essas pesquisas corroboram os resultados obtidos neste estudo, além de demonstrarem que os coagulantes orgânicos à base de tanino se apresentam como alternativa à substituição do sulfato de alumínio no tratamento de água.

As Fig. 2 e 3 trazem os gráficos de Pareto para os experimentos conduzidos com os coagulantes inorgânico e orgânico, respectivamente, com significância estatística de cada termo de 5% (p=0,05).

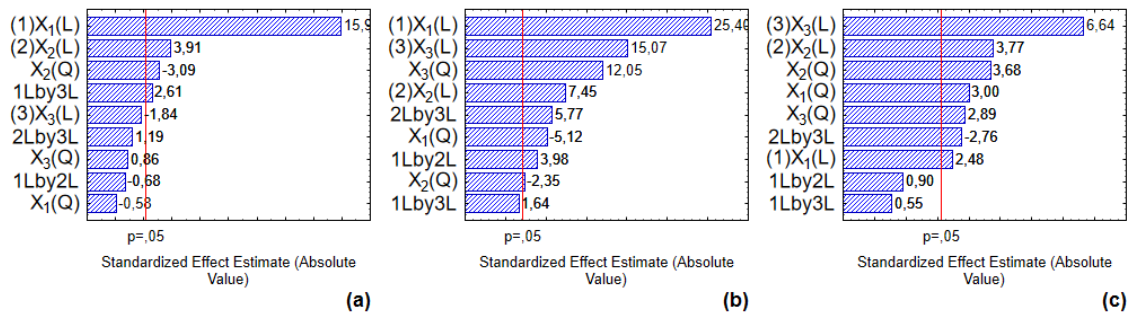


Figura 2 - Gráficos de Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de turbidez (a), cor aparente (b) e cor verdadeira (c), para os experimentos com coagulante inorgânico

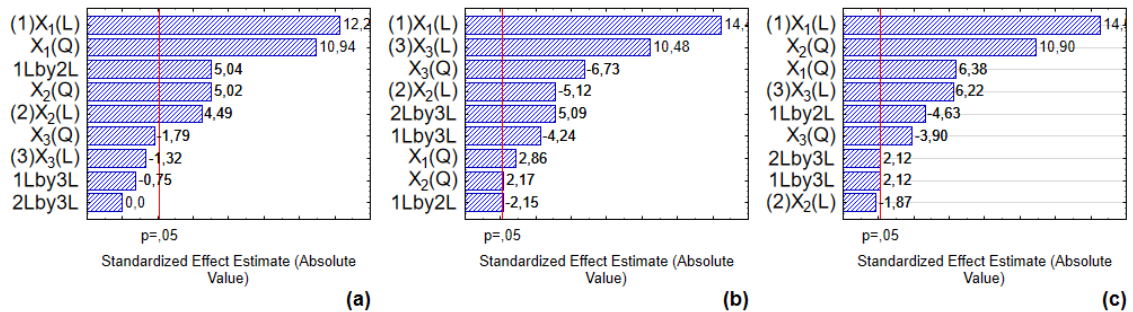


Figura 3 - Gráficos de Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de turbidez (a), cor aparente (b) e cor verdadeira (c), para os experimentos com coagulante orgânico

Como pode ser visto na Fig. 2, nos experimentos com coagulante inorgânico a remoção de turbidez é influenciada pela dosagem de coagulante em termo linear, pelo tempo de sedimentação em termos lineares e quadráticos e pela interação entre as dosagens de coagulante e desinfetante. Nas remoções de cor aparente e verdadeira, foi observada a influência de todos os termos, exceto: interação entre as dosagens de coagulante e desinfetante (em ambas) e entre a dosagem de coagulante e o tempo de sedimentação (apenas na cor verdadeira).

Nos experimentos com coagulante orgânico (Fig. 3), a remoção de turbidez é influenciada pela dosagem de coagulante e tempo de sedimentação, em termos lineares e quadráticos, e pela interação entre eles. Já as remoções de cor aparente e verdadeira são influenciadas por todos os

termos, exceto pelo tempo de sedimentação em termo linear na cor verdadeira.

Diante disso, pode-se observar a importância do processo de clarificação para a remoção de turbidez na SALTA-z, uma vez que esta foi influenciada principalmente pela dosagem de coagulante e pelo tempo de sedimentação, para ambos os coagulantes. A desinfecção, por sua vez, além de ser fundamental para a inativação de microrganismos patogênicos, mostrou-se relevante para a remoção de cor aparente e verdadeira neste sistema, onde é possível verificar uma influência significativa da dosagem de desinfetante, para ambos os coagulantes.

Com base nos gráficos de Pareto, Fig. 2 e 3, optou-se pela retirada dos termos que não foram significativos ($p > 0,05$) nos modelos. A Tabela 4 apresenta os valores estatísticos utilizados para avaliar a qualidade dos ajustes dos modelos.

Tabela 4 - Resultado do ajuste dos modelos

Estatística dos modelos	Coagulante inorgânico			Coagulante orgânico		
	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃
R ² (%)	90,66	96,68	77,77	85,17	92,50	92,77
R ² ajustado (%)	89,17	95,42	70,70	82,08	90,12	90,02
F _{calc} /F _{tab} (regressão)	22,00	31,60	4,46	10,52	15,76	13,91
F _{calc} /F _{tab} (falta de ajuste)	0,61	1,95	0,81	2,30	1,38	1,57

Com base na Tabela 4, todos os modelos foram significativos, com nível de confiança de 95%, pois para a regressão o F_{calc} é maior que o de F_{tab} (F_{calc}/F_{tab} > 1), como também apresentaram bons ajustes (F_{calc}/F_{tab} ≥ 4) (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2007). Entretanto, a falta de ajuste também foi significativa (F_{calc}/F_{tab} > 1); sendo assim, os modelos não são preditivos, pois para que isso ocorra a relação F_{calc}/F_{tab} < 1 deve ser obedecida, salve os modelos para a remoção de turbidez (Y1) e cor verdadeira (Y3) para o experimento com aplicação de coagulante inorgânico F_{calc}/F_{tab} de 0,61 e 0,81, respectivamente.

Apesar disso, os modelos propostos podem ser utilizados para determinar, dentro dos limites estudados, as condições ótimas de dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante, para os coagulantes inorgânico e orgânico, visto que, além de serem significativos (F_{calc}/F_{tab} > 1), apresentaram valores de R² acima de 78%. Esse coeficiente indica o quanto da variação dos dados é explicada pelo modelo; assim, quanto mais próximo de 1 for o R², menor será o erro e melhor será o modelo. Além do mais, modelos com R² maior que 0,60 (60%) podem ser utilizados para indicar tendência como também para fins preditivos (BARROS NETO et al., 2007). Carvalho et al. (2018) utilizaram seus modelos para prever a degradação de matéria orgânica pelos processos de flotação e ozonização, mesmo com faltas de ajuste significativas. Isso corrobora a utilização dos modelos propostos no presente trabalho para a determinação das condições ótimas de operação, desde que

estas sejam estabelecidas dentro das faixas de valores estudadas.

Os modelos ajustados para a remoção de turbidez, cor aparente e cor verdadeira foram escritos, respectivamente, de acordo com as Eq. 1, 2 e 3 para o DBB com coagulante inorgânico e pelas Eq. 4, 5 e 6 para o DBB com o coagulante orgânico.

$$R_{\text{turbidez}} = 72,74 + 0,49X_1 - 0,64X_2 + 0,02X_2^2 - 0,01X_1X_3 \quad (1)$$

$$R_{\text{cor aparente}} = 56,19 - 0,23X_1 + 0,01X_1^2 - 0,74X_2 + 0,01X_2^2 + 7,59X_3 - 0,97X_3^2 + 0,01X_1X_2 + 0,09X_2X_3 \quad (2)$$

$$R_{\text{cor verdadeira}} = 10,40 + 0,82X_1 - 0,01X_1^2 + 2,03X_2 - 0,03X_2^2 + 9,60X_3 - 0,65X_3^2 - 0,12X_2X_3 \quad (3)$$

$$R_{\text{turbidez}} = 69,09 + 1,03X_1 - 0,02X_1^2 + 0,50X_2 - 0,02X_2^2 + 0,01X_1X_2 \quad (4)$$

$$R_{\text{cor aparente}} = 53,40 + 0,76X_1 - 0,004X_1^2 - 0,01X_2^2 - 3,65X_3 + 0,57X_3^2 - 0,005X_1X_2 - 0,05X_1X_3 + 0,08X_2X_3 \quad (5)$$

$$R_{\text{cor verdadeira}} = 41,71 + 0,97X_1 - 0,01X_1^2 - 0,01X_2^2 - 6,97X_3 + 0,54X_3^2 - 0,003X_1X_2 + 0,03X_1X_3 + 0,14X_2X_3 \quad (6)$$

onde, X₁, X₂ e X₃ representam, respectivamente, a dosagem de coagulante (mg.L⁻¹), o tempo de sedimentação (min) e a dosagem de desinfetante (mg.L⁻¹).

As Fig. 4 e 5 ilustram as superfícies de resposta para o efeito combinado das variáveis independentes na remoção de turbidez, cor aparente e cor verdadeira para os experimentos com coagulante inorgânico e orgânico, respectivamente.

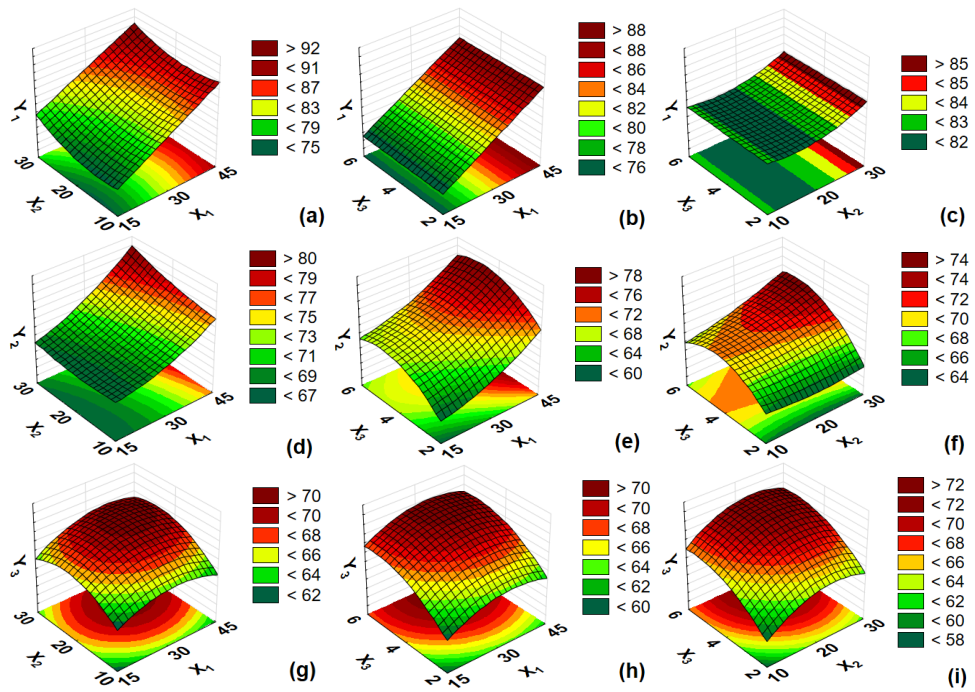


Figura 4 - Eficiência de remoção de turbidez (Y1), cor aparente (Y2) e cor verdadeira (Y3) com o emprego do coagulante inorgânico em função das variáveis independentes

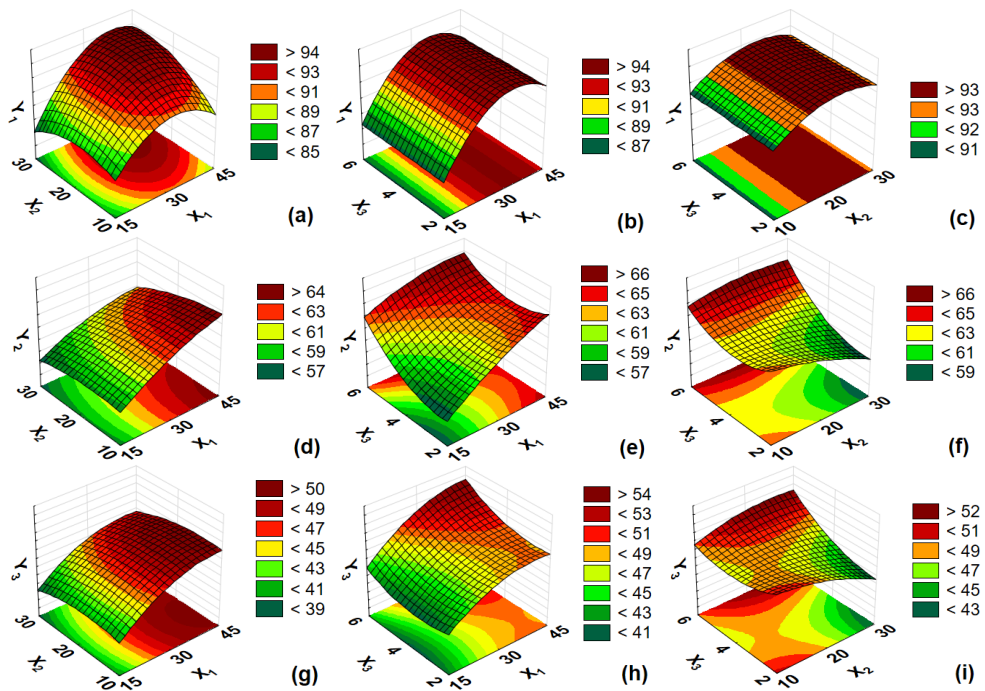


Figura 5 - Eficiência de remoção de turbidez (Y1), cor aparente (Y2) e cor verdadeira (Y3) com o emprego do coagulante orgânico em função das variáveis independentes

De acordo com a Fig. 4, fixando a dosagem de desinfetante no seu ponto central (4 mg.L^{-1}) e variando a dosagem de coagulante e o tempo de sedimentação (Fig. 4a, 4d e 4g), pode-se observar o aumento na eficiência de remoção das variáveis resposta com o aumento da dosagem do agente coagulante, sendo intensificado em maiores tempos de sedimentação, principalmente quando se trata da cor verdadeira (Fig. 4g).

Nas Fig. 4b, 4e e 4h, quando mantido o tempo de sedimentação no ponto central (20 min) correlacionando a dosagem de coagulante com a de desinfetante, foi possível verificar que o percentual de remoção de turbidez tende a aumentar à medida que a dosagem de coagulante aumenta, independentemente da dosagem de desinfetante (Fig. 4b). Para a remoção de cor aparente há uma tendência no aumento da eficiência quando se elevam as dosagens (Fig. 4e). Por seu turno, a remoção de cor verdadeira está diretamente relacionada ao aumento da dosagem de desinfetante (Fig. 4h).

Fixando-se a dosagem de coagulante em 30 mg.L^{-1} e variando o tempo de sedimentação e a dosagem de desinfetante (Fig. 4c, 4f e 4i), a remoção de turbidez pouco é influenciada por essas variáveis (Fig. 4c). No entanto, a eficiência do processo tende a ser elevada em maiores tempos de sedimentação e de dosagens de desinfetante para a cor aparente e verdadeira, conforme pode ser observado nas Fig. 4f e 4i, respectivamente.

Em relação às superfícies de resposta para os experimentos com o uso de coagulante orgânico, mantendo-se a dosagem de desinfetante no ponto central (4 mg.L^{-1}) e correlacionando a dosagem de coagulante e tempo de sedimentação (Fig. 5a, 5d e 5g), percebe-se que a remoção dos parâmetros é diretamente relacionada com as variáveis em questão. A turbidez é removida com maiores tempos de sedimentação e dosagem de coagulante (Fig. 5a). No entanto, maiores remo-

ções de cor aparente e verdadeira são verificadas em elevadas dosagens de coagulante e em menores tempos de sedimentação.

Quando o tempo de sedimentação é mantido no ponto central (20 min) e a dosagem de coagulante e a dosagem de desinfetante confrontados (Fig. 5b, 5e e 5h), verifica-se que a eficiência do processo em relação à remoção de turbidez (Fig. 5b) é proporcional ao aumento da dosagem do coagulante independentemente da dosagem de desinfetante. O que ocorre de forma diferente para a cor aparente e verdadeira (Fig. 5e e 5h, respectivamente), onde quanto maiores as dosagens de coagulante e de desinfetante, maiores são suas remoções.

Por fim, as Fig. 5c, 5f e 5i apresentam as superfícies de resposta que correlacionam o tempo de sedimentação e a dosagem de desinfetante, fixando-se a dosagem de coagulante em 30 mg.L^{-1} , onde observa-se que, nesta condição, a remoção de turbidez não é influenciada por essas variáveis (Fig. 5c). No entanto, a remoção de cor aparente e verdadeira (Fig. 5f e 5i, respectivamente) é intensificada em maiores dosagens de desinfetante e em ampla faixa de tempo de sedimentação.

Diante do exposto, constata-se que a dosagem de coagulante é o principal fator do processo. Isso é compreensível, uma vez que a função deste agente é desestabilizar as cargas dos sólidos coloidais e suspensos presentes na água e permitir que eles se aglomerem, formando flocos mais densos, que sedimentem com velocidades elevadas e, assim, sejam removidos no tratamento (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008; LIBÂNIO, 2016).

Com relação ao tipo de coagulante, observa-se que tanto o inorgânico como o orgânico promoveram elevadas eficiências de remoção de turbidez. Contudo, percebe-se que o orgânico alcançou melhores valores em dosagens menores que o inorgânico, o que favorece seu emprego.

O fato do coagulante orgânico de origem natural ser mais eficiente que o inorgânico é devido à sua capacidade de formação de rede, ou seja, enquanto o sulfato de alumínio atua apenas como agente coagulante, o orgânico apresenta longas moléculas (o tanino no caso do coagulante orgânico empregado nesse estudo) que favorecem a desestabilização das partículas coloidais presentes na água e reorganiza uma ação floculante, comportamento observado em outros agentes coagulantes/floculantes de origem orgânica a exemplo da Moringa (BONGIOVANI et al., 2016; GRAHAM et al., 2008; OKUDA et al., 2001; ROUSSY et al., 2005; SÁNCHEZ-MARTÍN; GONZÁLEZ-VELASCO; BELTRÁN-HEREDIA, 2010).

A afirmativa acima corrobora para que o tempo de sedimentação tenha sido um fator essencial para a remoção das variáveis estudadas, principalmente em relação à remoção de cor, sobretudo com a utilização do coagulante inorgânico, onde neste caso o sistema demandou maiores tempos para que promovesse maiores remoções. Todavia, para o coagulante orgânico, essa relação é observada apenas para a turbidez. Para os parâmetros cor aparente e verdadeira, verifica-se que as maiores remoções foram alcançadas em menores tempos. Isso indica que o floculo formado a partir do coagulante orgânico é mais denso que o obtido com o inorgânico, o que permite a sua sedimentação em menor tempo.

Não obstante, a remoção de cor (aparente e verdadeira) alcançou melhor performance com a utilização do inorgânico. De Oliveira et al. (2007) apontaram que o aumento da concentração de coagulantes vegetais na água é proporcional ao aumento da polimerização, fazendo com que a cor se torne mais acastanhada, o que poderia contribuir para um maior valor de cor em doses mais altas de tanino, fenômeno também observado por (IBRAHIM; YASER, 2019) ao analisar a remoção de cor de lixiviado de aterro tratado

biologicamente com a utilização de coagulante à base de tanino.

A dosagem de desinfetante, por sua vez, não atuou de forma significativa na remoção de turbidez, o que já era esperado, visto que suas principais funções no tratamento de água são a inativação de microrganismos patogênicos e a oxidação de matéria orgânica dissolvida (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008; LIBÂNIO, 2016). Diante disso, verifica-se que esta variável influenciou de forma significativa na remoção de cor aparente e verdadeira, o que pode ser justificado por meio de uma possível oxidação das substâncias que conferem cor à água, como a matéria orgânica natural, sendo este o principal precursor para a formação de subprodutos da desinfecção (SPD), como os trihalometanos.

Estudo realizado por Golea et al. (2017) destaca a cor como bom indicador da formação de SPD, entre outros parâmetros como absorvância da radiação ultravioleta específica (SUVA), carbono orgânico dissolvido, UV254nm como aponta este e outros estudos (GOLEA et al., 2017; HUA; RECKHOW; ABUSALLOUT, 2015; YANG et al., 2015). Em estudo recente, De Oliveira et al. (2020), ao avaliar o potencial de formação de trihalometanos resultante da aplicação de cloro na água bruta com presença de matéria orgânica natural hidrofílica com predominância de ácidos fúlvicos da lagoa de Extremoz, localizada no município de Extremoz, Rio Grande do Norte, Brasil, observaram uma correlação forte e significativa entre o potencial de formação de trihalometanos e a cor aparente. Assim sendo, a presença de cor na água pode promover a formação de trihalometanos, o que demanda um maior cuidado no controle operacional do sistema, a fim de proporcionar o fornecimento de água segura, uma vez que a exposição a esses subprodutos está associada a diversos riscos, como câncer cerebral, de bexiga, de cólon e reto, efeitos neurotoxicológicos, entre outros, como apontam diversos estudos (CANTOR et al.,

1999; DIANA; FELIPE-SOTELO; BOND, 2019; HAMIDIN; YU; CONNELL, 2008; HRUDEY et al., 2015; MOSER et al., 2007; RAHMAN et al., 2014).

No entanto, a SALTA-z apresenta como material filtrante zeólita natural (clinoptilolita), que tem potencial adsorvivo na remoção de matéria orgânica natural (MON), como relatado por (WANG; PENG, 2010) em revisão da aplicação de zeólitas naturais como adsorventes no tratamento de água e esgoto. A investigação relata a capacidade de adsorção de MON por zeólitas naturais na faixa de 2,35 a 68 mg.g⁻¹. Bem como Bhatnagar e Sillanpää (2017), que em levantamento de pesquisas que tratam do método de adsorção para a remoção de MON, apontam a zeólita como um

adsorvente empregado para esse fim. Os resultados dessas pesquisas demonstram que o filtro da SALTA-z pode ter ação efetiva na atenuação da MON presente na água, e conseqüentemente na formação dos SPD.

A partir dos modelos propostos, foi realizada a estimativa das condições ótimas para a remoção de turbidez, cor aparente e cor verdadeira na SALTA-z em escala de bancada por meio da função de desejabilidade. A Fig. 6 ilustra os diagramas da função de desejabilidade que descrevem as condições ideais para a dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante da SALTA-z em escala de bancada, dentro dos intervalos avaliados (Tabela 1).

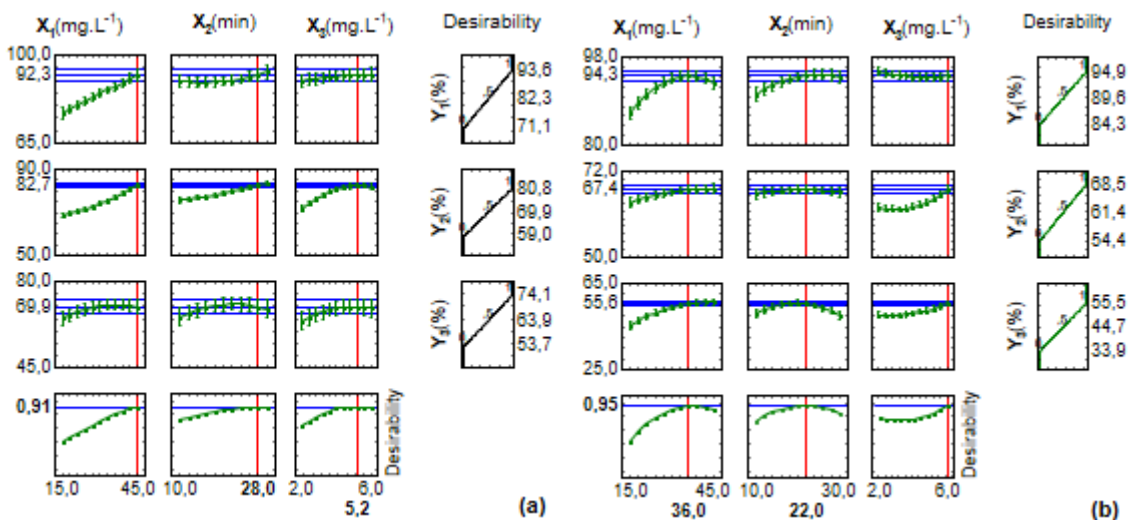


Figura 6 - Perfis dos valores preditos e a função de desejabilidade considerando todos os parâmetros analisados simultaneamente para o experimento com coagulante inorgânico (a) e orgânico (b)

Para os experimentos com coagulante inorgânico, Fig. 6a, a dosagem de coagulante necessária para atingir a resposta de desejabilidade obtida ($D = 0,91$) deve ser de 45,0 mg.L⁻¹ com tempo de sedimentação de 28 minutos e dosagem de desinfetante de 5,2 mg.L⁻¹. Essa condição promove remoções de 92,3, 82,7 e 69,9% de turbidez, cor aparente e cor verdadeira, respectivamente.

Para os experimentos com coagulante orgânico, Fig. 6b, a dosagem de coagulante necessária para atingir a resposta de desejabilidade obtida ($D = 0,95$) deve ser de 36,0 mg.L⁻¹ com tempo de sedimentação de 22 minutos e dosagem de desinfetante de 6,0 mg.L⁻¹, com uma remoção de 94,3% de turbidez, 67,4% de cor aparente e 55,6% de cor verdadeira.

As desejabilidades globais obtidas foram de 0,91 e 0,95 para os experimentos com coagulante inorgânico e orgânico, respectivamente, que segundo a escala de Harrington foi aceitável e excelente (qualidade incomum ou desempenho bem além do que está disponível no mercado) (RIBARDO; ALLEN, 2003).

A partir dos resultados de desejabilidade e consequentemente da obtenção dos valores ótimos do processo, nota-se que para se obter uma remoção de turbidez acima de 90% é necessária uma menor dosagem de coagulante orgânico (36,0 mg.L⁻¹) em relação ao inorgânico (45,0 mg.L⁻¹). No entanto, o primeiro caso demanda um maior tempo de sedimentação (28 min) que o segundo (22 min). Em contrapartida, os valores ótimos demonstram que as remoções de cor aparente e verdadeira conduzidos com coagulante orgânico (67,4 e 55,6%, respectivamente) foram inferiores ao inorgânico (82,7 e 69,9%, respectivamente), o que levou a uma maior demanda do desinfetante pelo sistema para o primeiro caso (6 mg.L⁻¹).

Assim, como pode ser visto na Fig. 7, que apresenta a variabilidade dos dados experimentais de turbidez, cor aparente e cor verdadeira, a água tratada atende ao padrão de turbidez (0,5 uT) requerido pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, principalmente quando é adotado o coagulante orgânico em todos os casos e quando são utilizadas dosagens acima de 30 mg.L⁻¹ do inorgânico (Fig. 7a). Por sua vez, houve adequação do parâmetro cor aparente à Portaria de potabilidade (15 uH) em todos os casos, o que viabiliza o uso do coagulante orgânico no processo, mesmo apresentando uma performance inferior à do sulfato de alumínio. A partir das Fig. 7b e 7c, verifica-se a necessidade

da adoção de maiores dosagens de desinfetante para promover a remoção de cor.

Além disso, o emprego de coagulantes à base de substâncias naturais, como a *A. mearnsii*, planta-base do coagulante orgânico empregado neste estudo, apresenta vantagens como remoção do alumínio no processo de tratamento e, consequentemente, a eliminação do manejo de lodos metálicos de complexo manejo (MORAES; SCHNEIDER; CARISSIMI, 2019). Em relação à viabilidade financeira, os autores apontam que o custo de aquisição do coagulante orgânico obtido a partir da *A. mearnsii* é cerca de 2,4 vezes maior que o do sulfato de alumínio. Entretanto, uma vez que esse coagulante não consome alcalinidade durante o tratamento, seu custo elevado pode ser compensado com a redução do uso de outros produtos químicos, com o uso de cal hidratada para correção de pH, caso seja necessário. Outro fator que viabiliza o emprego do coagulante orgânico é a diminuição do volume de lodo gerado (25% menor que o do sulfato de alumínio) e o fato de que o mesmo pode ser reaproveitado, ao contrário do lodo que contém metais, que demanda custos para transporte e disposição em aterros de resíduos industriais perigosos.

Assim, principalmente ao se tratar de soluções alternativas de abastecimento de água para consumo humano, como a SALTA-z, onde a operação e gestão é por parte dos usuários do sistema, a utilização desse tipo de produto minimiza os riscos associados à qualidade da água tratada bem como à destinação final dos resíduos gerados no processo, promovendo melhoria na qualidade de vida dos usuários e auxiliando na universalização do acesso a água de qualidade.

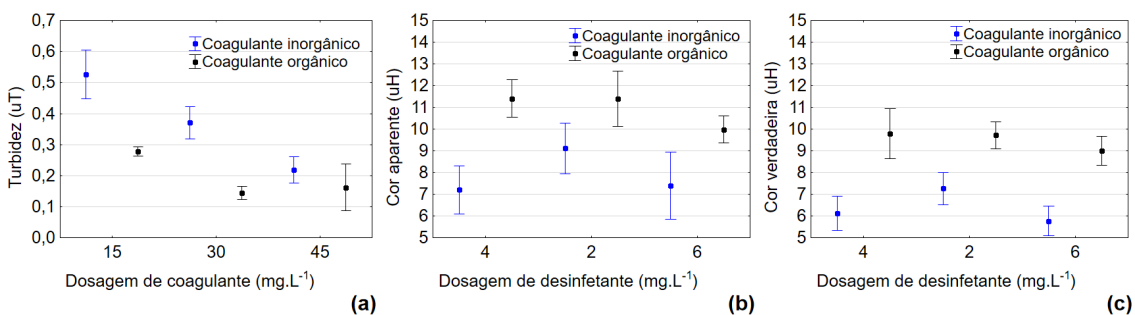


Figura 7 - Variabilidade dos dados de turbidez (a), categorizados pela dosagem e tipo de coagulante, cor aparente (b) e cor verdadeira (c), categorizados pela dosagem e tipo de desinfetante

5 CONCLUSÕES

A aplicação da MSR, por meio de experimentos em DBB, foi fundamental para avaliar as interações entre as variáveis, propor modelos simplificados e identificar as condições ótimas de dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante para operação da SALTA-z.

O coagulante orgânico apresentou-se mais eficiente na remoção do parâmetro turbidez, enquanto o coagulante inorgânico apresentou melhor performance na remoção de cor aparente e cor verdadeira.

A remoção da turbidez foi influenciada principalmente pela dosagem dos coagulantes e pelo tempo de sedimentação. O agente desinfetante, além de desempenhar o importante papel de garantir a qualidade sanitária da água tratada pela inativação dos microrganismos patogênicos, atuou como agente oxidante, fundamental na remoção dos parâmetros cor aparente e cor verdadeira.

A SALTA-z foi capaz de se adequar aos padrões de potabilidade de água estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, para os parâmetros avaliados. Assim, a tecnologia SALTA-z proposta pela Funasa apresentou resultados satisfatórios, que ressaltam o seu potencial como alternativa para o abastecimento de água de qualidade e segura em comunidades ruais e/ou difusas do Semiárido.

6 AGRADECIMENTOS

À Capes pela bolsa de estudos, à Fundação Nacional de Saúde (Funasa), à Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) e à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela cooperação técnica para a realização da pesquisa.

7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Santos WB; **Metodologia:** Santos WB; **Investigação:** Santos WB, Lopes TSA e Torquato AL; **Redação - Primeira versão:** Santos WB; **Redação - Revisão & Edição:** Santos WB, Lopes TSA, Torquato AL, Ferreira WB, Lima VLA e Diniz CR; **Aquisição de Financiamento:** Ferreira WB e Lima VLA; **Recursos:** Ferreira WB e Lima VLA; **Supervisão:** Santos WB, Ferreira WB e Lima VLA.

8 REFERÊNCIAS

- APHA; AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 2012.
- 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.
- BELTRÁN-HEREDIA, J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; DÁVILA-ACEDO, M. A. Optimization of the synthesis of a new coagulant from a tannin extract. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186, n. 2–3, p. 1704–1712, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.075>

- BEZERRA, M. A. et al. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. **Talanta**, v. 76, n. 5, p. 965–977, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>
- BHATNAGAR, A.; SILLANPÄÄ, M. Removal of natural organic matter (NOM) and its constituents from water by adsorption – A review. **Chemosphere**, v. 166, p. 497–510, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.098>
- BONGIOVANI, M. C. et al. Removal of natural organic matter and trihalomethane minimization by coagulation/flocculation/filtration using a natural tannin. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 12, p. 5406–5415, 2016. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1006260>
- CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de experimentos usando Statistica**. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2003.
- CANTOR, K. P. et al. Drinking water source and chlorination byproducts in Iowa. III. Risk of brain cancer. **American Journal of Epidemiology**, v. 150, n. 6, p. 552–560, 1999. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a010052>
- CARVALHO, M. C. S. et al. Combined use of O₃/H₂O₂ and O₃/Mn²⁺ in flotation of dairy wastewater. **Rev. Ambient. Água**, v. 13, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2078>
- DE OLIVEIRA, I. M. et al. Tannin-treated water for use in the emulsion polymerization of SBR. effect of ageing on mechanical properties. **International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials**, v. 56, n. 9, p. 939–944, 2007. <https://doi.org/10.4322/polimeros.2013.062>
- DE OLIVEIRA, R. R.; ARAÚJO, A. L. C.; DUARTE, M. A. C. Study of trihalomethanes potencial formation in Extremoz-RN pond. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 315–322, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020181889>
- DIANA, M.; FELIPE-SOTELO, M.; BOND, T. Disinfection byproducts potentially responsible for the association between chlorinated drinking water and bladder cancer: A review. **Water Research**, v. 162, p. 492–504, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.07.014>
- FERREIRA, L. A. F. et al. Saneamento rural no planejamento municipal: lições a partir do Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR). **Revista DAE**, v. 67, n. 220, p. 36–51, 2019. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.054>
- 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**. Brasília: FUNASA, 2017. v. 49
- GOLEA, D. M. et al. THM and HAA formation from NOM in raw and treated surface waters. **Water Research**, v. 112, p. 226–235, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.051>
- GRAHAM, N. et al. Characterisation and coagulation performance of a tannin-based cationic polymer: A preliminary assessment. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 327, n. 1–3, p. 9–16, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2008.05.045>
- HAMIDIN, N.; YU, Q. J.; CONNELL, D. W. Human health risk assessment of chlorinated disinfection by-products in drinking water using a probabilistic approach. **Water Research**, v. 42, n. 13, p. 3263–3274, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.02.029>
- HRUDEY, S. E. et al. Evaluating Evidence for Association of Human Bladder Cancer with Drinking-Water Chlorination Disinfection By-Products. **Journal of Toxicology and Environmental Health – Part B: Critical Reviews**, v. 18, n. 5, p. 213–241, 2015. <https://doi.org/10.1080/10937404.2015.1067661>
- HUA, G.; RECKHOW, D. A.; ABUSALLOUT, I. Correlation between SUVA and DBP formation during chlorination and chloramination of NOM fractions from different sources. **Chemosphere**, v. 130, p. 82–89, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.039>
- IBGE. **Censo Demográfico 2010**.
- IBRAHIM, A.; YASER, A. Z. Colour removal from biologically treated landfill leachate with tannin-based coagulant. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 6, p. 103483, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103483>
- KALLÓ, D. Applications of natural zeolites in water and wastewater treatment. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 45, n. 1, p. 518–550, 2001. <https://doi.org/10.2138/rmg.2001.45.15>
- MACHADO, G. et al. Chemical modification of tannins from *Acacia mearnsii* to produce formaldehyde free flocculant. **Science of the Total Environment**, v. 745, p. 140875, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140875>
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4o edição ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- MORAES, B. S.; SCHNEIDER, I. A. H.; CARISSIMI, E. PRODUÇÃO DE COAGULANTE A BASE DE TANINO DE *Acacia mearnsii* E POTENCIAIS USOS NO SETOR INDUSTRIAL E NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO: A EXPERIÊNCIA BRASILEIRA. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 12, n. 1, p. 169–180, 2019. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2019.12.1.58114>
- MOSER, V. C. et al. Neurotoxicological evaluation of two disinfection by-products, bromodichloromethane and dibromoacetonitrile, in rats. **Toxicology**, v. 230, n. 2–3, p. 137–144, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2006.11.007>
- OKUDA, T. et al. Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in *Moringa oleifera* seeds. **Water Research**, v. 35, n. 3, p. 830–834, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00296-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00296-7)

RAHMAN, M. B. et al. Colon and rectal cancer incidence and water trihalomethane concentrations in New South Wales, Australia. **BMC Cancer**, v. 14, n. 1, p. 1–9, 2014. <https://doi.org/10.1186/1471-2407-14-445>

RIBARDO, C.; ALLEN, T. T. An alternative desirability function for achieving “six sigma” quality. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 19, n. 3, p. 227–240, 2003. <https://doi.org/10.1002/qre.523>

ROLAND, N. et al. A ruralidade como condicionante da adoção de soluções de saneamento básico. **Revista DAE**, v. 67, n. 220, p. 15–35, 2019. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.053>

ROUSSY, J. et al. Treatment of ink-containing wastewater by coagulation/flocculation using biopolymers. **Water SA**, v. 31, n. 3, p. 369–376, 2005. <https://doi.org/10.4314/wsa.v31i3.5208>

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; GONZÁLEZ-VELASCO, M.; BELTRÁN-HEREDIA, J. Acacia mearnsii de Wild Tannin-Based Flocculant in Surface Water Treatment. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 29, n. 2, p. 119–135, 2009. <https://doi.org/10.1080/02773810902796146>

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; GONZÁLEZ-VELASCO, M.; BELTRÁN-HEREDIA, J. Surface water treatment with tannin-based coagulants from Quebracho (*Schinopsis balansae*). **Chemical Engineering Journal**, v. 165, n. 3, p. 851–858, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.10.030>

SILVA, B. B. et al. Evidenciando experiências positivas em saneamento básico: visões do Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR). **Revista DAE**, v. 67, n. 220, p. 69–86, 2019. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.056>

SILVEIRA, T. N. et al. Performance de coagulantes orgânicos e inorgânicos por meio de diagrama de coagulação em águas naturais. **Gesta**, v. 7, n. 1, p. 16–25, 2019. <https://doi.org/10.9771/gesta.v7i1.28068>

STATSOFT, I. **STATISTICA (data analysis software system)**www.statsoft.com.,, 2011.

TETTEH, E. K.; RATHILAL, S.; CHOLLOM, M. N. Pre-Treatment of industrial mineral oil wastewater using response surface methodology. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 216, p. 181–191, 2017. <https://doi.org/10.2495/WS170171>

WANG, S.; PENG, Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 11–24, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>

WANG, W. et al. Effects of advanced oxidation pretreatment on residual aluminum control in high humic acid water purification. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 7, p. 1079–1085, 2011. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60520-7](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60520-7)

XU, W. et al. Influence of shear force on floc properties and residual aluminum in humic acid treatment by nano-Al13. **Journal of Hazardous Materials**, v. 271, p. 1–8, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.049>

YANG, L. et al. Assessing trihalomethanes (THMs) and N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation potentials in drinking water treatment plants using fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis. **Chemosphere**, v. 121, p. 84–91, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.033>