



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

FERNANDA GOMES BERNARDINO

**REMOÇÃO DE TURBIDEZ POR UMA SOLUÇÃO ALTERNATIVA
COLETIVA SIMPLIFICADA DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA
CONSUMO HUMANO (SALTA-z) SIMULADO EM ESCALA DE
BANCADA**

**CAMPINA GRANDE – PB
2020**

FERNANDA GOMES BERNARDINO

**REMOÇÃO DE TURBIDEZ POR UMA SOLUÇÃO ALTERNATIVA COLETIVA
SIMPLIFICADA DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO
(SALTA-z) SIMULADO EM ESCALA DE BANCADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Weruska Brasileiro Ferreira.

Coorientador: Prof. Me. Whelton Brito dos Santos.

**CAMPINA GRANDE - PB
2020**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

B523r Bernardino, Fernanda Gomes.
Remoção de turbidez por uma solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água para consumo humano (SALTA-z) simulado em escala de bancada [manuscrito] / Fernanda Gomes Bernardino. - 2020.
28 p. : il. colorido.
Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.
"Orientação : Profa. Dra. Weruska Brasileiro Ferreira, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."
1. Tratamento de água. 2. Turbidez. 3. Coagulantes químicos. I. Título

21. ed. CDD 628.162

FERNANDA GOMES BERNARDINO

REMOÇÃO DE TURBIDEZ POR UMA SOLUÇÃO ALTERNATIVA COLETIVA
SIMPLIFICADA DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO
(SALTA-Z) SIMULADO EM ESCALA DE BANCADA

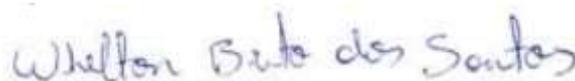
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Sanitária e Ambiental da Universidade
Estadual da Paraíba, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Aprovada em: 15/12/2020.

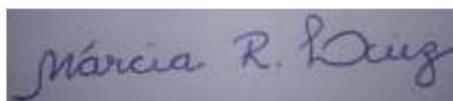
BANCA EXAMINADORA



Profa. Dra. Weruska Brasileiro Ferreira (Orientadora)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Whelton Brito dos Santos (Coorientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Profa. Dra. Marcia Ramos Luiz
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Me. Thiago Santos de Almeida Lopes
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela oportunidade, força de vontade e coragem para superar todos os desafios ao longo da graduação.

Aos meus pais, João Bernardino e Givanilda Gomes, por desde sempre acreditarem e confiarem que eu seria capaz, por todo apoio, paciência e compreensão.

A minha irmã, pelo companheirismo de sempre, por todo apoio e confiança.

Aos professores do curso, pelos ensinamentos repassados, pela dedicação e comprometimento durante toda a graduação.

Aos orientadores, Weruska Brasileiro e Whelton Brito, pela confiança, dedicação, apoio e ensinamentos prestados ao longo do desenvolvimento da pesquisa, desempenhando a função da melhor forma possível.

Ao grupo de pesquisa do LARTECA por todo apoio e contribuição para o desenvolvimento da pesquisa.

As minhas amigas de curso, Pâmela Rodrigues e Rafaela Pereira, por todo companheirismo, amizade e apoio.

A todos que contribuíram para a realização desse sonho.

RESUMO

No Brasil, a grande maioria da população que não tem acesso a água potável encontra-se nas regiões mais afastadas dos centros urbanos como as zonas rurais. Para suprir esta demanda, faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias alternativas que disponham de água potável para a população, com baixo custo e de fácil operação e manutenção, dentre elas, tem-se a solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água para consumo humano (SALTA-z). Para avaliar o desempenho do SALTA-z em escala de bancada e com isso otimizá-lo, utilizou-se água proveniente do reservatório Epitácio Pessoa, localizado no município de Boqueirão-PB. Os fatores operacionais avaliados foram dosagem do coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante e a variável resposta foi remoção de turbidez da água filtrada. Para comparar a eficiência do tratamento do sistema utilizou-se o sulfato de alumínio (inorgânico) e o Tanfloc SL® (orgânico) como agentes coagulantes. Os resultados obtidos mostram redução de turbidez entre 71,14–92,62% com o sulfato de alumínio e 84,97–94,09% nos ensaios com o Tanfloc SL®. Os valores de turbidez da água filtrada foram inferiores ao recomendado pela Portaria de Consolidação nº5/2017 do Ministério da Saúde em 93,33% dos ensaios. Os principais efeitos observados para remoção de turbidez foram a dosagem de coagulante e o tempo de sedimentação. As condições ideais de dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante para se obter a melhor eficiência na remoção dos parâmetros foram, respectivamente, 45,0mg.L⁻¹, 30min e 6mg.L⁻¹ para o coagulante inorgânico e 30,0mg.L⁻¹, 20min e 4,0mg.L⁻¹ para o orgânico. Os resultados indicam que o sistema que simula o SALTA-z em escala de bancada foi eficaz na remoção de turbidez e que os ensaios com o Tanfloc SL® apresentaram os melhores resultados, uma vez que apresentou as maiores porcentagens de remoção e demanda de menores dosagens de produtos químicos. Para a validação das diretrizes estabelecidas em laboratório é necessário avaliar o sistema em escala real.

Palavras-Chave: Tratamento de água. Turbidez. Coagulantes químicos.

ABSTRACT

In Brazil, the biggest part of population that does not have access to drinkable water are found in regions more distant from urban centers as rural areas. To supply this demand, there is a need of developing alternative technologies that can afford drinkable water to the population with low cost, easy operation and maintenance, among them, there is the alternative collective simplified solution of water treatment for human consumption (SALTA-z*). For evaluating the SALTA-z performance on bench scale then improving it, using water from Epitácio Pessoa reservoir that is located in Boqueirão city. The evaluated operational factors were coagulant dosage, sedimentation time and disinfectant dosage, and the variable response was turbidity removal of filtered water. Besides that, for comparing the efficiency of the treatment system was used aluminum sulfate (inorganic) and the Tanfloc SL® (organic) as coagulant agents. The gotten results presented turbidity reduction among 71,14-92,62% with aluminum sulfate and 84,97-94,09% in the Tanfloc SL® tests. The turbidity values of filtered water were inferior to what is recommended by the Consolidation Ordinance nº5/2017 from Health Ministry in 93,33% of the tests. The main observed effects for the removal of turbidity were coagulant dosage and sedimentation time. The ideal conditions to coagulant dosage, sedimentation time and disinfectant dosage for obtaining a better efficiency on removing of parameters were, respectively, 45,0mg.L-1, 30min and 6ml.l-1 for inorganic coagulant, and, 30,0ml.L-1, 20min and 4,0mg.L-1 to the organic one. The results indicate that the system which simulates SALTA-z in the bench scale was effective on removal of turbidity and the tests with Tanfloc SL® showed the best results, once, it presented the best percentages on removing and demanding lower dosages of chemistry products. To the validation of the established guidelines on laboratory, there is a need of evaluating the system in real scale.

Keywords: Water treatment. Turbidity. Chemistry coagulants.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	OBJETIVO.....	8
2.1	Objetivo geral	8
2.2	Objetivos específicos	8
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
3.1	Tratamento de água para consumo humano	9
3.2	Solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água para consumo humano (SALTA-z).....	10
3.3	Coagulantes	12
3.3.1	Coagulantes inorgânicos	12
3.3.2	Coagulantes orgânicos	12
3.4	Parâmetros de qualidade da água	13
3.4.1	Turbidez	13
3.5	Metodologia de superfície de resposta	13
4	METODOLOGIA.....	14
4.1	Local de coleta e dos ensaios experimentais	14
4.2	Procedimento experimental	14
4.3	Análise estatística.....	15
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	17
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	25
	REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), bilhões de pessoas ainda não têm acesso a água potável e a outros serviços de saneamento (WHO; UNICEF, 2017). Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos é um dos objetivos de desenvolvimento sustentável proposto pela cúpula da Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, estabelecendo que até o ano de 2030 seja alcançado o acesso universal e equitativo de água potável e segura para todos.

A Pesquisa Nacional por Amostra em Domicílio – PNAD/2009 destaca que apenas 32,8% dos domicílios nas áreas rurais do Brasil estão ligados à rede de abastecimento de água com ou sem canalização interna. 67,2% da população capta água de chafarizes e poços, sendo eles protegidos ou não, em cursos de água que não dispõem de tratamento, e em outras fontes geralmente insalubres (IBGE, 2019).

O Plano Nacional de Saneamento Básico afirma que o atendimento adequado de abastecimento é caracterizado pelo fornecimento de água potável por rede de distribuição ou por poço, nascente ou cisterna, com canalização interna, em qualquer caso sem intermitências (paralisações ou interrupções) (PLANSAB, 2013).

Devido à problemática de acesso a água potável em regiões remotas e/ou rural, faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias alternativas que disponham de água potável para a população, com baixo custo e de fácil operação e manutenção.

Neste cenário surge a Solução Alternativa Coletiva Simplificada de Tratamento de Água para Consumo Humano, SALTA-z, desenvolvido pela Fundação Nacional da Saúde (FUNASA), o sistema possui uma estrutura física simplificada e fazendo uso de filtro e dosadores de características artesanais, de fácil aplicação, instalação e apropriação pelas comunidades, com potencial transformador social e ambiental (CNM, 2019).

De acordo com o mesmo autor, o SALTA-z reúne todas as etapas do tratamento convencional de água (coagulação, floculação, decantação, desinfecção e filtração) em uma estrutura simplificada. O diferencial desse sistema está na utilização de zeólita como meio filtrante. Estudos indicam que a utilização de zeólita como meio filtrante permite a remoção de ferro, manganês e outros metais pesados, amônia, cloroaminas, matéria orgânica, proteína e lipídios.

Em relação ao uso de produtos químicos, tem-se a etapa de coagulação como uma etapa fundamental no tratamento de água que utiliza agentes químicos capazes de desestabilizar as partículas presentes na água, sendo os coagulantes a base de ferro e alumínio os mais utilizados no Brasil. No entanto, existem estudos como o de Libânio (2008), que relaciona o uso deste coagulante com doenças neurológicas, comprometendo a saúde pública e, ainda, requerendo um controle sobre o residual de alumínio na água tratada destinada ao consumo humano.

Assim, os coagulantes orgânicos, produzidos a partir de vegetais, surgem como alternativa promissora, pois apresentam vantagens em relação aos coagulantes inorgânicos, sendo biodegradáveis, não tóxicos e geram lodo em menor quantidade e com menores teores de metais (GOMES et al., 2017). Além disso, via de regra, não alteram o pH da água, apresentam boa remoção de cor e turbidez e também promovem expressiva remoção de bactérias (NWAIWU; LINGMU, 2011).

O sistema SALTA-z foi desenvolvido para atender as comunidades isoladas e/ou difusas, a fim de alcançar a universalização do acesso a água de forma segura, sem oferecer risco à saúde dos usuários. No entanto, o sistema apresenta um empirismo relacionado a operação, manutenção e a utilização de produtos químicos, nesse sentido, é necessário avaliar se o SALTA-z atende aos padrões de potabilidade do Ministério da Saúde para o fornecimento de água segura.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Avaliar a influência de fatores operacionais no sistema reproduzido para simular o SALTA-z em escala de bancada para tratamento de água para consumo humano utilizando coagulantes inorgânico e orgânico.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência do sistema reproduzido para simular o SALTA-z em escala de bancada para tratamento de águas na remoção de turbidez.
- Avaliar a eficiência do tratamento em relação ao emprego de diferentes coagulantes.
- Empregar a metodologia de superfície de resposta para avaliar o processo.

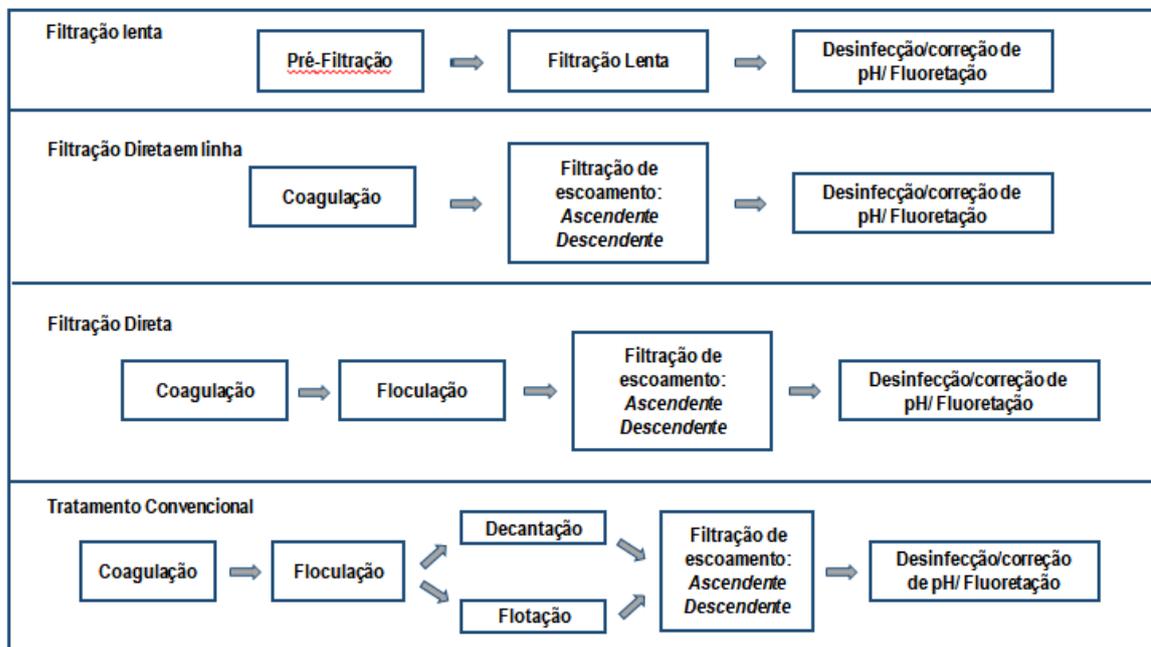
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Tratamento de água para consumo humano

O processo de tratamento de água pode ser visto como um conjunto de manipulações da água em suas mais diferentes apresentações, de modo que esta possa ser considerada apta para o abastecimento público (FERREIRA FILHO, 2017).

A Figura 1 detalha as tecnologias de tratamento de água mais utilizadas e conhecidas no mundo, que são a filtração lenta, a filtração direta em linha, a filtração direta e o tratamento convencional.

Figura 1 – Esquema das principais tecnologias de tratamento de água



Fonte: Adaptado de Libânio (2008).

A qualidade das águas naturais influencia diretamente na escolha do tratamento de água a ser aplicado vai depender da qualidade das águas naturais. Os principais parâmetros avaliados são turbidez, cor aparente, *E. coli* e algas, a Tabela 1 descreve os valores de referência para turbidez, parâmetro avaliado no estudo.

Tabela 1 – Valores de referência para turbidez em função da tecnologia de tratamento recomendada

Característica/Tecnologia	Convencional	Filtração Direta	Filtração Lenta*	Filtração direta em linha
Turbidez (uT)	< 3000	< 20	< 10	< 5

*Sem pré-filtração. Fonte: Kawamura (2000).

O tratamento convencional de água ou tratamento de ciclo completo consiste no tratamento de água bruta através de um processo de aplicação de coagulante na etapa de mistura rápida, seguido de uma etapa de mistura lenta com o objetivo de formar flocos mais densos para posterior sedimentação (nas unidades de decantação) ou flotação (nas unidades de flotação), realizando assim a clarificação da água (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008).

Após esta etapa de clarificação, a água segue para uma unidade filtração, ascendente ou descendente com material filtrante de granulometria apropriada (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008). A principal etapa do tratamento é a coagulação, uma vez que todos os processos subsequentes necessitam de uma boa desestabilização das partículas suspensas e coloidais (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011).

3.2 Solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água para consumo humano (SALTA-z)

A Solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água para consumo humano (SALTA-z) foi desenvolvido pela Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) com o objetivo de fornecer um tratamento de água simplificado para uso doméstico às populações ribeirinhas do estado do Pará e atualmente está se estudando a aplicabilidade deste para outras regiões, a exemplo da região semiárida (FUNASA, 2017). O SALTA-z tem como objetivo disponibilizar água potável a pequenas comunidades, de zonas rurais, ribeirinhas e povoados indígenas e quilombolas, com cerca de 25 indivíduos. Dentre as características do SALTA-z tem-se: fácil aplicação, instalação e apropriação dos sistemas pelas comunidades, baixo custo, facilidade operacional (CNM, 2019).

As zeólitas são classificadas como aluminossilicatos hidratados, altamente cristalinos, que ao desidratarem-se desenvolvem no cristal uma estrutura porosa, com diâmetros de poro de 3 a 10 Angstroms. Esta estrutura forma microporos (cavidades) que podem ser ocupadas por íons e moléculas de água com grande liberdade de movimento, tornando as zeólitas altamente adsorventes (CNM, 2019).

Figura 2 – Representação esquemática do SALTA-z



Fonte: adaptado de FUNASA (2017).

O sistema opera seguindo os seguintes passos: a água bruta é drenada (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 melhor dispersão da massa líquida, o que resulta em uma melhor homogeneização 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).

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).

3.3 Coagulantes

Coagulante é o agente químico adicionado à água ou efluente que se deseja tratar, para desestabilizar as partículas coloidais presentes e iniciar a formação do floco, os coagulantes podem ser químicos, orgânicos, sintéticos ou naturais (METCALF; EDDY, 2003).

3.3.1 Coagulantes inorgânicos

São compostos químicos de origem inorgânica que possuem as propriedades de aglomerar as impurezas da água através dos íons de elevada carga positiva gerados em sua solubilidade na água quando aplicados a um ponto de elevado gradiente de agitação (SANTOS, 2001).

Os principais coagulantes inorgânicos empregados são os sais de alumínio e de ferro, ambos são ambientalmente indesejáveis, pois os lodos produzidos podem disponibilizar íons solúveis que comprometem a saúde humana (VAZ et al., 2010).

O sulfato de alumínio é um coagulante inorgânico comercializado de forma sólida (granulado ou em pó) e possui características ácidas quando preparada a solução. Quando adicionado a água na etapa de mistura rápida, o sulfato de alumínio proporciona a formação de grandes espécies polinucleadas. É o coagulante mais utilizado nas estações de tratamento de água no Brasil devido ao seu baixo custo (RICHTER, 2009).

3.3.2 Coagulantes orgânicos

Os coagulantes de origem natural quando comparados com os coagulantes inorgânicos, se apresentam bastante vantajosos. Por terem origem orgânica, eles não apresentam alterações na alcalinidade da água e o lodo gerado tem menor volume e menor quantidade de metais pesados (VAZ et al., 2010).

De acordo com a TANAC/SA, produtora de coagulantes orgânicos a base de tanino, o Tanfloc SG® e o Tanfloc SL® são considerados polímeros orgânicos catiônicos de baixo peso molecular, de origem essencialmente vegetal e que atuam como coagulantes/floculantes e auxiliares de coagulação, no tratamento de águas em geral.

A principal desvantagem do uso do Tanfloc é o seu custo, tendo este um valor monetário maior que o sulfato de alumínio. Em contrapartida, a não necessidade de utilização de agentes alcalinizantes para alteração de pH da água, as mais baixas dosagens utilizadas de coagulantes e a redução nos custos com o tratamento do lodo gerado podem reduzir potencialmente os custos de operação (MORAIS, 2019).

3.4 Parâmetros de qualidade da água

Os parâmetros físicos e químicos têm forte influência no tratamento de água, usualmente são empregados para avaliar a eficiência do tratamento de água. A seguir será discutido o parâmetro turbidez e seu efeito no processo de potabilização.

3.4.1 Turbidez

O termo turbidez é aplicado para águas que contém materiais em suspensão, que interferem na passagem de luz através dela (SAWYER et al., 2003). Este vem sendo consolidado como um dos principais parâmetros na avaliação do desempenho das estações de tratamento. Há muito tempo no meio técnico consolidou-se a premissa da maior eficiência da desinfecção, independente do desinfetante empregado, para águas com turbidez baixa, em virtude da proteção conferida aos microrganismos pelas partículas suspensas na massa líquida, por vezes denominada efeito-escudo (LIBÂNIO, 2008).

A Portaria de consolidação nº 5/2017 do MS afirma que a turbidez representa uma correlação com a presença de protozoários na água, diante disso limita os valores de turbidez para distribuição de água de abastecimento em 0,5 UNT, decrescendo esse valor para 0,3 UNT quando a média aritmética da concentração de oocistos de *Cryptosporidium* spp. for maior ou igual a 3,0 oocistos/L no(s) pontos(s) de captação de água.

3.5 Metodologia de superfície de resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) pode ser entendida como uma combinação de técnicas de planejamento de experimentos, análise de

regressão e métodos de otimização e se baseia no ajuste de modelos matemáticos empíricos aos dados experimentais obtidos segundo uma determinada matriz experimental com o objetivo de descrever o comportamento destes dados e fazer previsões estatisticamente válidas (HANRAHAN, 2006).

Sua aplicação é amplamente aceitável devido à rapidez e menor número de experimentos, análise de regressão bem projetada, avaliação e identificação dos fatores de entrada mais significativos que podem afetar o processo e ajudar o pesquisador a se concentrar na identificação e controle (TETTEH; RATHILAL; CHOLLOM, 2017).

4 METODOLOGIA

4.1 Local de coleta e dos ensaios experimentais

A água bruta usada nos testes foi proveniente do reservatório Epitácio Pessoa, localizado no município de Boqueirão, Paraíba, com ponto de coleta na estação de tratamento de água de Gravatá (ETA-Gravatá), localizada no município de Queimadas, Paraíba. Para execução dos ensaios de tratabilidade em escala de bancada coletou-se 200L no canal de chegada da água bruta, armazenada em galões e posteriormente encaminhada ao laboratório na temperatura ambiente. Os procedimentos analíticos foram realizados no Laboratório de Referência em Tecnologias de Águas (LARTECA), vinculado ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia da UEPB.

As determinações analíticas de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, alcalinidade, dureza e pH foram realizadas de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WPCF, 2012).

4.2 Procedimento experimental

O sistema reproduzido para simular o SALTA-z em escala real era composto por um equipamento jar test (jarros de dois litros), que simula a etapa de clarificação, e filtro de bancada contendo meio filtrante composto por areia grossa e zeólita do

tipo clinoptilolita, para a etapa de filtração, de maneira que se mantém a mesma taxa de filtração estabelecida no sistema SALTA-z, de $15\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

A etapa de clarificação foi realizada conforme recomendação do 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.

Após a etapa de clarificação, coletou-se um litro da água decantada de cada jarro, adicionou diferentes dosagens do agente desinfetante e foram realizadas, imediatamente, as filtrações, sendo as águas filtradas coletadas e feito as leituras de turbidez.

Foi utilizado dois agentes coagulantes nos experimentos, a fim de comparar a eficiência do tratamento: o sulfato de alumínio (inorgânico), sendo este o agente coagulante mais empregado no tratamento de água para consumo humano e o Tanfloc SL® (orgânico), que segundo Silveira et al. (2019), apresenta resultados satisfatórios na remoção de cor aparente e turbidez para as águas provenientes do reservatório Epitácio Pessoa.

4.3 Análise estatística

Para determinar as condições ótimas de operação do SALTA-z utilizou-se a metodologia da superfície de resposta (MSR), por meio de experimentos em delineamento Box-Behnken (DBB).

Os fatores operacionais que interferem na eficiência do tratamento e considerados como variáveis independentes são: dosagem do coagulante (X_1); tempo de sedimentação (X_2) e dosagem do desinfetante (X_3). A Tabela 2 apresenta os valores codificados e não codificados dos níveis dos fatores selecionados, definidos através de ensaios preliminares.

Tabela 2 – Fatores e níveis do delineamento Box-Behnken

Fatores	Símbolo	Níveis do delineamento Box-Behnken		
		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 do desinfetante) e 3 repetições no ponto central, somaram-se 15 ensaios de tratabilidade, que foram realizados em duplicata, o que resultou em 30 testes de tratabilidade para cada um dos coagulantes empregados.

A variável resposta ou dependente foi remoção de turbidez (%), determinada conforme descrito pela Equação 1.

$$Y_n = \frac{Y_{ab} - Y_t}{Y_{ab}} \times 100 \quad (1)$$

onde, Y_n é a eficiência ou percentual de remoção da resposta ou variável dependente, Y_{ab} é o valor da resposta ou variável dependente na água bruta e Y_t o valor da resposta ou variável dependente na água tratada.

A relação entre as variáveis independentes e a variável resposta foi estabelecida por meio de modelos de regressão de segunda ordem. A análise de variância (ANOVA) foi aplicada com o intuito de testar a adequação desses modelos.

A determinação das condições ótimas para a remoção de turbidez no sistema SALTA-z em escala de bancada 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 isso, foi empregado o Statistica® 10.0 (STATSOFT, 2011).

Com o objetivo de verificar a ocorrência de variação estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre os valores de turbidez obtidos nos dois tipos de ensaios (com coagulante inorgânico e orgânico) aplicou-se o teste t de Student, com o auxílio do Microsoft Office Excel 2010.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

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.

A Tabela 3 apresenta os valores de remoção de turbidez para os experimentos com coagulante inorgânico e orgânico obtidos para os ensaios de tratabilidade propostos pelo DBB e os valores obtidos no teste t de Student.

Tabela 3 – Matriz de ensaios de tratabilidade obtidos por DBB para o experimento com os coagulantes orgânico e inorgânico para a remoção de turbidez

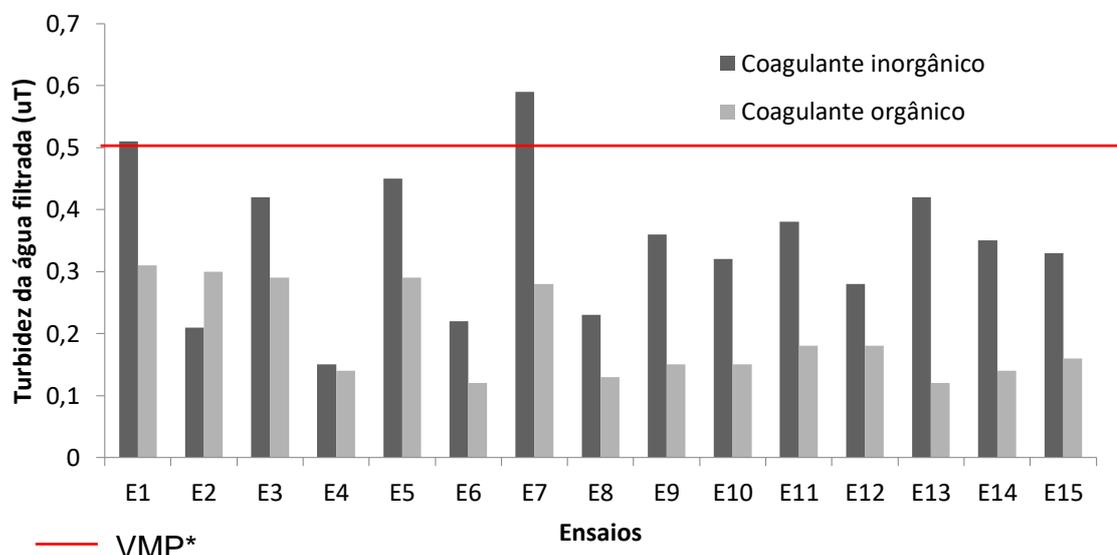
Ensaio	X1	X2	X3	Teste t de Student	Remoção de turbidez (%)			
					Coagulante inorgânico		Coagulante orgânico	
E1	15	10	4	0,02908	75,23	± 1,61	84,97	± 0,54
E2	45	10	4	0,22828	89,78	± 1,61	85,61	± 1,82
E3	15	30	4	0,00276	79,78	± 0,32	85,86	± 0
E4	45	30	4	0,71194	92,62	± 1,45	93,44	± 1,27
E5	15	20	2	0,00247	78,18	± 0,33	85,73	± 0,18
E6	45	20	2	0,08907	89,21	± 1,12	94,09	± 1,09
E7	15	20	6	0,00699	71,14	± 0	86,25	± 1,27
E8	45	20	6	0,10775	88,64	± 1,61	93,58	± 0,73
E9	30	10	2	0,03215	82,61	± 1,77	92,68	± 0,54
E10	30	30	2	0,01341	84,32	± 0,96	92,67	± 0,18
E11	30	10	6	0,01345	81,71	± 1,12	91,39	± 0,18
E12	30	30	6	0,00531	86,37	± 0,32	91,39	± 0,18
E13	30	20	4	0,01363	79,77	± 1,29	94,09	± 1,09
E14	30	20	4	0,03313	82,96	± 1,28	93,32	± 1,45
E15	30	20	4	0,14263	84,21	± 3,37	92,16	± 0,18

X1 = dosagem de coagulante (mg.L-1); X2 = tempo de sedimentação (min); X3 = dosagem de desinfetante (mg.L-1).

Os resultados obtidos mostram que o tratamento foi eficaz, com remoção de turbidez entre 71,14-92,62% com o coagulante inorgânico e 84,97-94,09% nos ensaios com coagulante orgânico. O teste t de Student aponta que os ensaios E1, E3, E5, E7, E9, E10, E11, E12, E13 e E14 apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) para entre os experimentos com coagulante inorgânico e orgânico, rejeitando assim a hipótese nula e comprovando que há diferença entre os efeitos estudados (SCHWAAB e PINTO, 2007).

A remoção de turbidez nos ensaios que apresentaram diferença significativa, o coagulante orgânico apresenta melhor desempenho, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Resultados da turbidez da água filtrada para os ensaios com os coagulantes inorgânico e orgânico

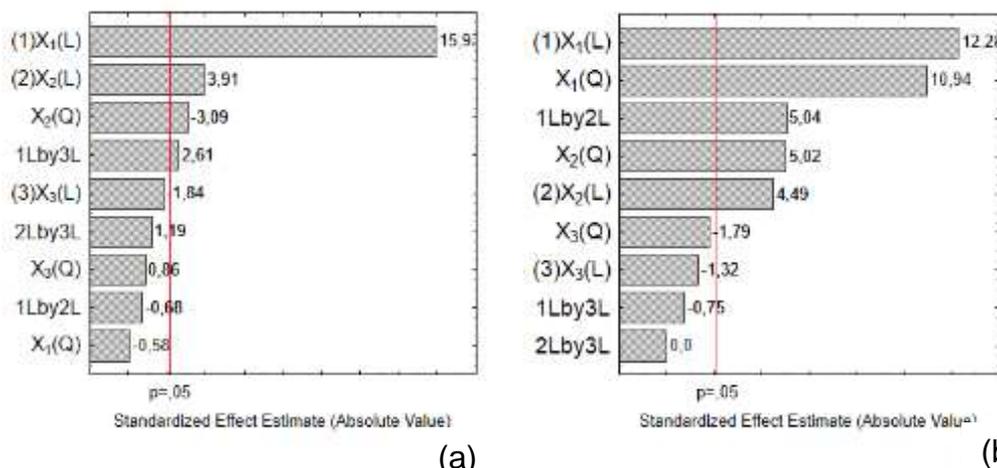


*VMP = valor máximo permitido para turbidez, segundo a Portaria de Consolidação nº 5/2017.

A Figura 3 destaca que 93,33% das amostras apresentam valores de turbidez para a água filtrada inferior ao recomendado pela Portaria de Consolidação nº5 de 2017 do Ministério da Saúde, apenas os ensaios E1 e E7 com o uso de coagulante inorgânico resultaram em valores superiores ao preconizado pela Portaria de 0,5 uT. Este valor está correlacionado a remoção de enterovírus, cistos de *Giardia spp* e oocistos de *Cryptosporidium sp.* (BRASIL, 2017).

A Figura 4 apresenta os gráficos de Pareto para a regressão realizada, com significância estatística de cada termo da equação de 5% ($p=0,05$).

Figura 4 – Gráficos de Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de turbidez para os experimentos com coagulante inorgânico (a) e coagulante orgânico (b)



X_1 = dosagem de coagulante (mg.L^{-1}); X_2 = tempo de sedimentação (min); X_3 = dosagem de desinfetante (mg.L^{-1}).

Os principais efeitos observados nos Gráficos de Pareto (Figura 3) foram a dosagem de coagulante e o tempo de sedimentação, o que demonstra que o processo de clarificação desempenha importante papel no tratamento em relação a remoção de turbidez.

As Equações 2 e 3 expressam os modelos ajustados para os valores de remoção de turbidez com coagulante inorgânico e orgânico, respectivamente.

$$R \text{ turbidez} = 80,15 - 0,69X_2 + 0,02X_2^2 + 0,05X_1X_3 \quad (2)$$

$$R \text{ turbidez} = 71,27 \mp 1,05X_1 - 0,02X_1^2 + 0,48X_2 - 0,02X_2^2 + 0,01X_1X_2 \quad (3)$$

onde, X_1 , X_2 e X_3 representam, respectivamente, a dosagem coagulante (mg.L^{-1}), tempo de sedimentação (min) e dosagem coagulante (mg/L), limitadas às faixas consideradas no estudo: $15 < X_1 < 45 \text{ mg.L}^{-1}$; $10 < X_2 < 30 \text{ min}$ e $2 < X_3 < 6 \text{ mg.L}^{-1}$.

Os valores estatísticos utilizados para avaliar a qualidade do modelo adequado aos dados, para os experimentos com os coagulantes orgânicos e inorgânicos, estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado do ajuste dos modelos

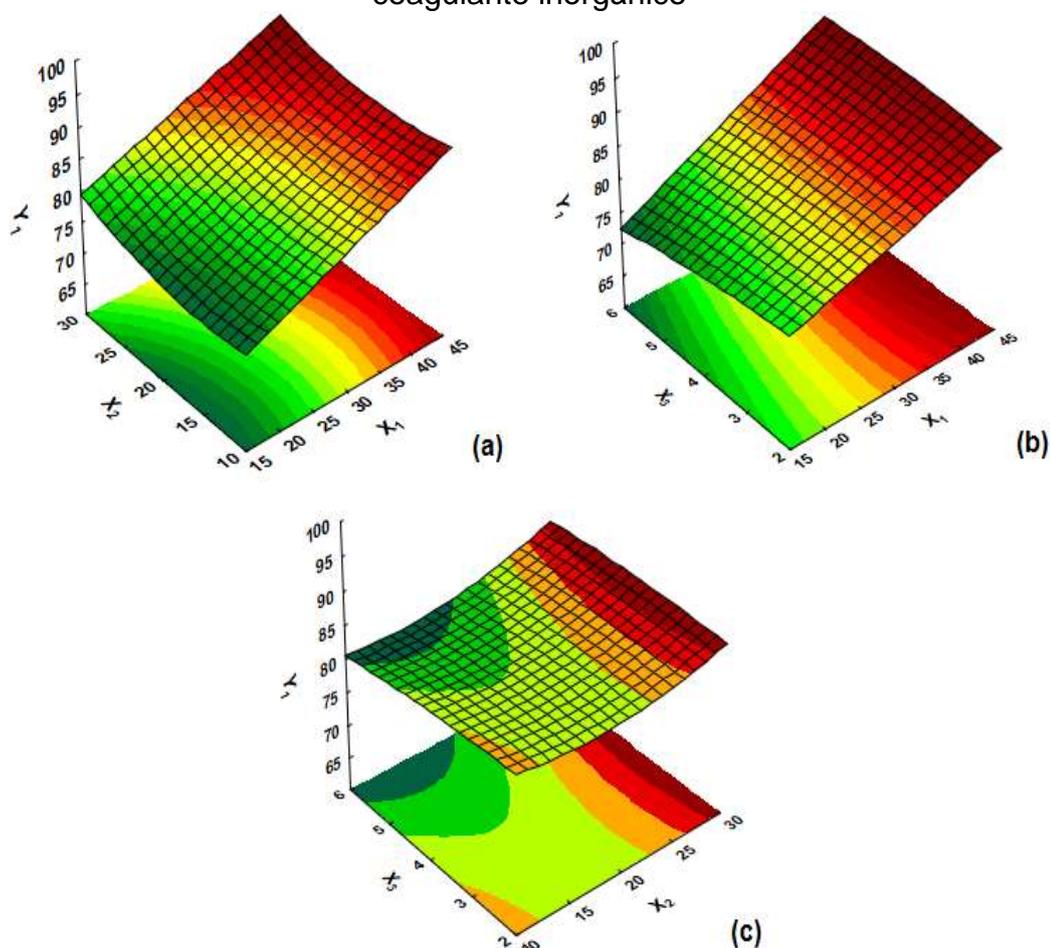
Estatística dos modelos	Remoção de turbidez (%)	
	Coagulante inorgânico	Coagulante orgânico
R^2 (%)	92,58	86,56
R^2 ajustado (%)	89,25	80,51
$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$ (regressão)	11,59	5,98
$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$ (falta de ajuste)	0,67	3,82

A partir da Tabela 4, observa-se que os dois modelos são significativos, com um nível de confiança de 95%, pois para a regressão o F_{calc} é maior que o de F_{tab} ($F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}} > 1$). Além disso, verificou-se a falta de ajuste significativo ($F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}} > 1$), apenas para o modelo com aplicação do coagulante orgânico.

Os coeficientes de regressão linear (R^2) indicam que 92,58% para os experimentos com coagulante inorgânico e 86,56% com o orgânico da variação observada nos dados pode ser explicada pelos modelos.

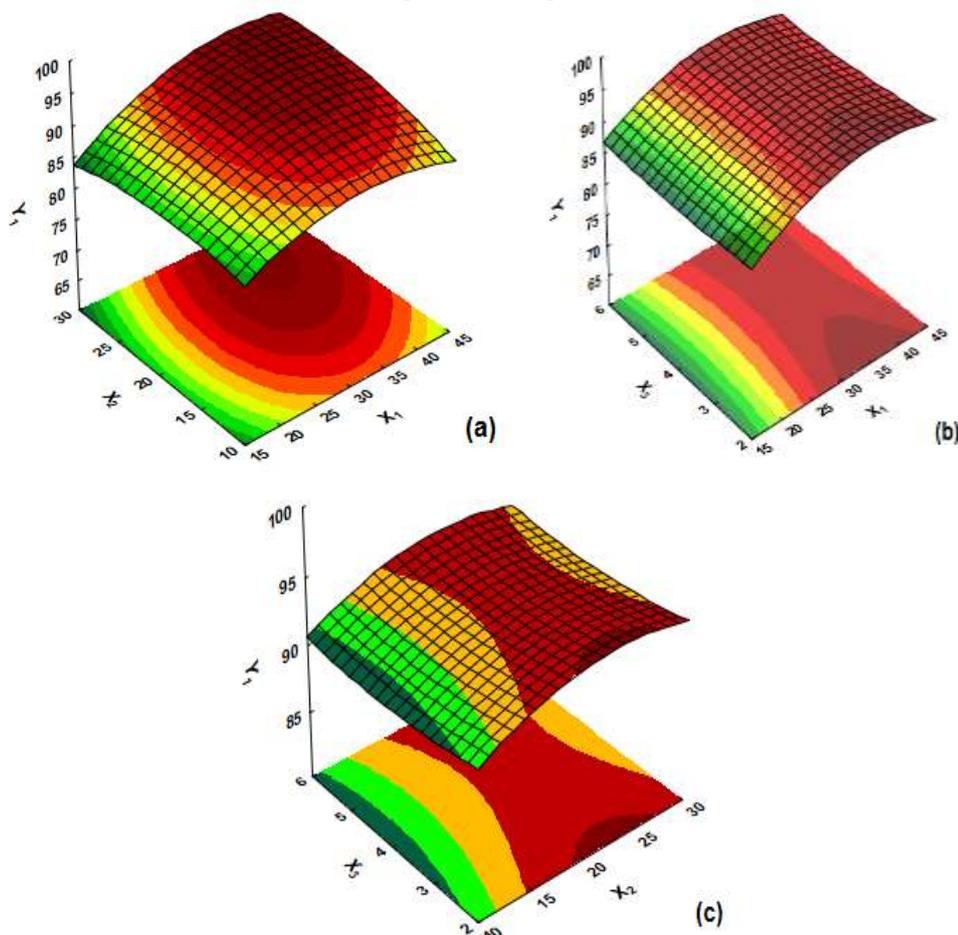
Para avaliar o efeito de dois fatores independentes e suas interações na eficiência de remoção de turbidez construiu-se os gráficos de superfície de resposta com base nos modelos quadráticos usando MSR. As Figuras 5 e 6 ilustram os gráficos de superfície para o efeito combinado das variáveis independentes na remoção de turbidez em ambos os experimentos.

Figura 5 – Superfícies de resposta do efeito combinado da dosagem do coagulante (X_1) com o tempo de sedimentação (X_2); dosagem do coagulante (X_1) com a dosagem de desinfetante (X_3); tempo de sedimentação (X_2) com a dosagem de desinfetante (X_3) na de eficiência de remoção de turbidez (Y_1) com o emprego do coagulante inorgânico



X_1 = dosagem de coagulante (mg.L^{-1}); X_2 = tempo de sedimentação (min); X_3 = dosagem de desinfetante (mg.L^{-1}); Y_1 = remoção de turbidez.

Figura 6 – Superfícies de resposta do efeito combinado da dosagem do coagulante (X_1) com o tempo de sedimentação (X_2); dosagem do coagulante (X_1) com a dosagem de desinfetante (X_3); tempo de sedimentação (X_2) com a dosagem de desinfetante (X_3) na de eficiência de remoção de turbidez (Y_1) com o emprego do coagulante orgânico



X_1 = dosagem de coagulante (mg.L^{-1}); X_2 = tempo de sedimentação (min); X_3 = dosagem de desinfetante (mg.L^{-1}); Y_1 = remoção de turbidez.

As superfícies de resposta comprovam a influência positiva da dosagem dos coagulantes empregados e do tempo de sedimentação, conforme destacado nos gráficos de Pareto.

Avaliando as superfícies de resposta com uso do coagulante inorgânico observa-se que as maiores porcentagens de remoção de turbidez foram observadas nas maiores dosagens de coagulante e maiores tempo de sedimentação (Figura 5A). Observa-se que a dosagem de desinfetante não interfere na remoção de turbidez, visto que, quando avalia-se as relações $X_1 \times X_3$ e $X_2 \times X_3$ os melhores desempenhos são observados nas maiores dosagens de coagulante e maiores tempos de sedimentação, em qualquer faixa de dosagem de desinfetante (Figuras

5B e 5C). As maiores eficiências são observadas nas faixas de 40 a 45 mg.L⁻¹ de dosagem do coagulante e próximo a 30 minutos para o tempo de sedimentação.

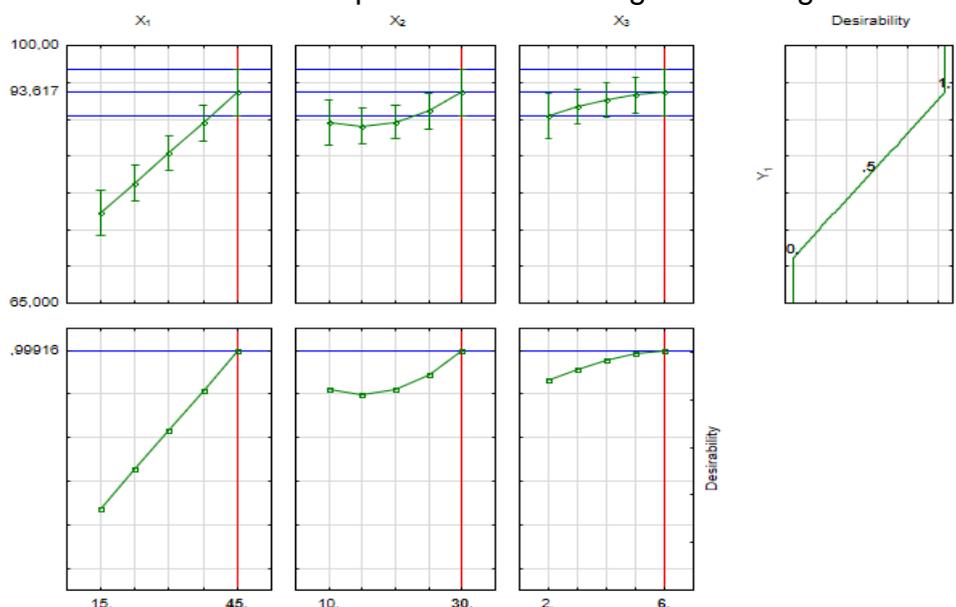
Os experimentos com uso de coagulante orgânico destacam que a dosagem do coagulante e o tempo de sedimentação apresentam correlações positivas em termos lineares e quadráticos, observando a relação positiva entre dosagem de coagulante e tempo de sedimentação, com máxima eficiência entre o tempo de sedimentação de 20 a 30 minutos e a dosagem de coagulante entre 30 e 40 mg.L⁻¹ (Figura 6A). As Figuras 6B e 6C destacam que a dosagem do desinfetante não influencia na remoção de turbidez.

Os resultados obtidos destacam a dependência da dosagem de coagulante e tempo de sedimentação para a remoção de turbidez, como afirma Nepomuceno (2016) em seu estudo.

A partir dos modelos propostos, foi realizado a estimativa das condições ótimas para a remoção de turbidez no sistema SALTA-z em escala de bancada por meio da função de desejabilidade.

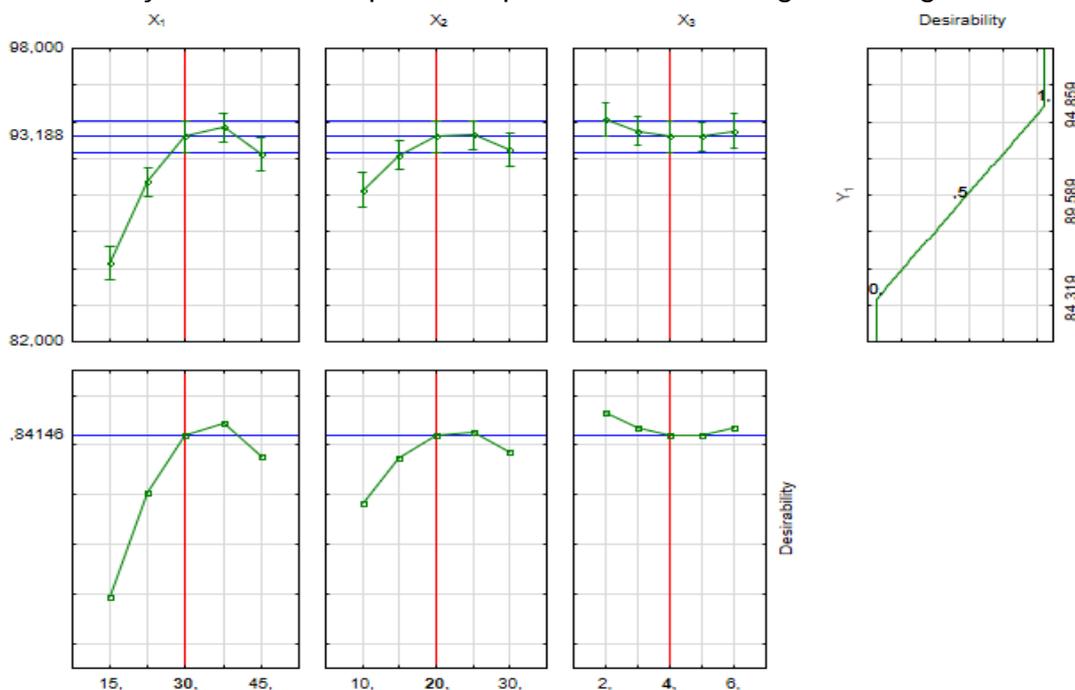
As Figuras 7 e 8 mostram os diagramas da função de desejabilidade que descrevem as condições ideais para as dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante do sistema de SALTA-z em escala de bancada, dentro dos intervalos avaliados.

Figura 7 – Perfis dos valores preditos e a função de desejabilidade para remoção de turbidez com o experimento com coagulante inorgânico



X₁ = dosagem de coagulante (mg.L⁻¹); X₂ = tempo de sedimentação (min); X₃ = dosagem de desinfetante (mg.L⁻¹); Y₁ = remoção de turbidez.

Figura 8 – Perfis dos valores preditos e a função de desejabilidade considerando a remoção de turbidez para o experimento com coagulante orgânico



C

X_1 = dosagem de coagulante (mg.L^{-1}); X_2 = tempo de sedimentação (min); X_3 = dosagem de desinfetante (mg.L^{-1}); Y_1 = remoção de turbidez.

Para os experimentos com coagulante inorgânico (Figura 7), a dosagem e coagulante necessária para atingir a resposta de desejabilidade obtida ($D = 0,99$) deve ser de $45,0 \text{ mg.L}^{-1}$ com tempo de sedimentação de 30 minutos e dosagem de desinfetante de $6,0 \text{ mg.L}^{-1}$, obtendo assim, uma remoção de turbidez de aproximadamente 93,67%.

Para os experimentos com coagulante orgânico (Figura 8), a dosagem e coagulante necessária para atingir a resposta de desejabilidade obtida ($D = 0,84$) deve ser de $30,0 \text{ mg.L}^{-1}$ com tempo de sedimentação de 20 minutos e dosagem de desinfetante de $4,0 \text{ mg.L}^{-1}$, resultando em uma remoção de turbidez de 93,18%.

A resposta de desejabilidade obtida em ambos os coagulantes foram na faixa de 0,8 a 1, que, segundo RIBARDO e ALLEN (2003) pode ser considerada aceitável e excelente (qualidade incomum ou desempenho bem além do que está disponível no mercado)

Para atingir, aproximadamente, a mesma porcentagem de remoção de remoção, o coagulante orgânico requer menores valores dos parâmetros operacionais, recomendando assim seu uso, em detrimento ao coagulante inorgânico.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, podem ser tiradas as seguintes considerações:

- O sistema reproduzido para simular o SALTA-z em escala de bancada se demonstrou eficaz na potabilização da água em termos de turbidez;
- O coagulante orgânico se demonstrou mais eficiente, uma vez que apresentou maiores porcentagens de remoção e com isso, a turbidez da água tratada apresentou valores baixos, com menores valores de dosagem de coagulante, tempo de sedimentação e dosagem de desinfetante.
- Faz-se necessário maiores estudos com relação ao custo-benefício da aplicação dos coagulantes orgânicos em detrimento dos coagulantes inorgânicos.
- É necessário avaliar o SALTA-z em escala real para validação das diretrizes estabelecidas em laboratório.

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.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017**. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde, 2017.

CNM. Confederação Nacional de Municípios – CNM Coletânea Guias de Reaplicação (5 volumes) - Programa SALTA-Z - Abaetetuba/PA (v.1) Brasília: CNM, 2019.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tecnologias de Tratamento, Processos e Operações**. In:_____. Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos: LDiBe, 2011. p. 97-153.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**. Editora LDiBe. v 1 e v.2. p.1560, 2008.

FERREIRA FILHO, S. S.. **Tratamento de água : concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2017, 1. ed..

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.

GOMES, T.V.B; SOUZA, T.D; BRUZZE P.F.B. Tratabilidade de Água Superficial Utilizando Coagulantes Naturais à Base de Tanino e Extratos de Sementes de Moringa oleífera. *Ensaio Cienc., Cienc. Biol. Agrar. Saúde*, v.21, n.3, p. 152-155, 2017.

HANRAHAN, G. **Application of Factorial and Response Surface Methodology in Modern Experimental Design and Optimization**. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2006, 36, 141.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios*. 2019.

KAWAMURA S. **Integrated design and operation of water treatment facilities**. 2nd ed. New York: Wiley; 2000: 691 p.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Átomo, 2ª ed, 2008.

METCALF & EDDY, Inc.; TCHOBANOGLIOUS, George (revisor); BURTON, Franklin L. (revisor); STENSEL, David H. (revisor). **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

MORAIS, B. S.; SCHNEIDER, I. A. H.; CARISSIMO, 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**. v.12, no.1, 2019, 169-180.

NEPUMOCENO, T. C. **Estudo de aplicabilidade de aplicabilidade de coagulantes orgânicos e inorgânicos no tratamento de água para abastecimento público**. TCC(Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba, Paraíba, 2016.

NWAIWU, N.E., LINGMU, B. Studies on the effect of settling time on coliform reduction using moringa oleiferaseed powder. *J. Appl. Sci. Environ. Sanitation*, v.6, n.32, p.279-286, 2011.

PLANSAB. Plano Nacional de Saneamento Básico. Disponível em: <https://www.cidades.gov.br/saneamento-cidades/plansab/texto-do-plansab>. Acesso em 26 mar. 2020.

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.

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009. 340p,

SANTOS, H. R. **Aplicação de coagulantes no afluente de reator anaeróbio de leite expandido alimentado com esgoto doméstico**. 2001. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

SAWYER, C. N.; MCCARTY P. L.; PARKIN, G. F. **Chemistry for environmental engineering and science**. 5. Ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 752 p.

SCHWAAB, M., PINTO, J.C. **Análise de Dados Experimentais I. Fundamentos de Estatística e Estimação de Parâmetros**. Rio de Janeiro, E-Papers, 2007.

SILVEIRA, T. N. BARBOSA, M. G. N. PEQUENO, L. A. B. SANTOS, W. B. FERREIRA, W. B. **Performance de coagulantes orgânicos e inorgânicos por meio de diagrama de coagulação em águas naturais**. *Gesta*, v. 7, n. 1, p. 16–25, 2019.

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

TANAC/SA. Tanfloc: Coagulante/floculante de origem vegetal. Tanac S.A. Montenegro/RS, Disponível na internet via WWW. URL: <http://www.tanac.com.br/PT/index.php>. Acesso em: 20.11.2020.

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.

VAZ, L. G.; KLEN, M. R. F.; VEIT, M. T.; SILVA, E. A.; BARBEIRO, T. A.; BERGAMASO, R. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. **Revista Eclética Química**. São Paulo, v. 35, n 4, 2010.

WHO; UNICEF. **Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene - 2017 Update and SDG Baselines**. [s.l.] World Health Organization. II. UNICEF, 2017.