

Otimização do tratamento de água cinza a partir do uso combinado de coagulantes químicos

Treatment optimization of greywater from the combined use of chemical coagulants

Heber Martins de Paula^{1*}, Carlos Eduardo Fernandes¹

RESUMO

Com a crescente demanda e escassez de água são necessários esforços para viabilizar fontes alternativas de abastecimento. Assim, este trabalho teve como objetivo otimizar o tratamento da água cinza, associando os coagulantes químicos sulfato de alumínio e cloreto férrico para possibilitar o reúso da água tratada. Para tanto, a pesquisa foi dividida em três etapas: caracterização da água cinza proveniente de lavatório e chuveiro de uma residência unifamiliar; avaliação do uso combinado de sulfato de alumínio e cloreto férrico, preparados em solução de 5%, para o tratamento da água cinza, otimizando as concentrações dos coagulantes químicos aplicando o Delineamento Composto Central Rotacional e avaliando os dados via Metodologia de Superfície de Resposta e Desejabilidade Global; e avaliação da eficiência do tratamento proposto, confrontando as dosagens ótimas determinadas com os testes em laboratório. Os resultados indicaram que a associação do sulfato de alumínio (concentração de 0,470 g.L⁻¹) e do cloreto férrico (concentração de 0,115 g.L⁻¹) potencializou o tratamento, atingindo uma remoção de turbidez da água cinza de até 94%. Além desses resultados, houve redução de coliformes termotolerantes e do cloro residual, possibilitando o reúso na descarga das bacias sanitárias e em processos de irrigação.

Palavras-chave: água cinza; otimização do tratamento; reúso; coagulante químico.

ABSTRACT

With the growing demand and shortage of water, efforts are needed to enable alternative sources of supply. Thus, this work was focused on optimizing the treatment of greywater by associating the chemical coagulants aluminum sulfate and ferric chloride, to enable their reuse. Therefore, the research was divided into three stages: characterization greywater from basin and shower of a single-family residence; assessing the combined use of aluminum sulfate and ferric chloride, prepared in 5% solution for the treatment of greywater, optimizing the concentrations of chemical coagulants applying Central Composed of Rotational Design and evaluating the data via Methodology Surface Response and Global Desirability; and evaluating the effectiveness of the proposed treatment, comparing the optimum dosages determined with laboratory tests. The results indicated that the combination of aluminum sulfate (concentration 0.470 g.L⁻¹) and ferric chloride (concentration 0.115 g.L⁻¹) potentiated treatment, achieving a removal of greywater turbidity of up to 94%; also, thermotolerant coliforms and residual chlorine were reduced, making it possible to reuse them in the discharge of toilets and in irrigation.

Keywords: greywater; treatment optimization; reuse; chemical coagulant.

INTRODUÇÃO

Segundo o Relatório das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Água (2015), 748 milhões de pessoas ainda não possuem acesso à água potável, e até 2030 a população mundial enfrentará um déficit de água de 40%, caso não haja melhora na gestão desse recurso natural. Portanto, com a crescente demanda dos recursos hídricos para satisfazer às necessidades da população, o problema em relação à escassez de água aumentará expressivamente (COUTO *et al.*, 2015).

Vale ressaltar que, com o problema de escassez de água, os estudos sobre o reúso desse recurso natural foram intensificados, destacando como fonte alternativa o reúso de água cinza (BLANKY *et al.*, 2015). Segundo Li, Wichmann e Otterpohl (2009), essas águas são provenientes dos chuveiros, dos lavatórios, da pia de cozinha e da máquina

de lavar roupas, representando em torno de 50 a 80% da água residual produzida em uma edificação. No Brasil, esse valor pode variar em torno de 36% (BARRETO, 2008). Os volumes são consideráveis e podem representar uma redução no consumo de água potável, caso seja praticado o reúso.

A conservação da água e o reúso são ferramentas eficazes na preservação dos recursos hídricos. Contudo, cabe destacar que o reúso, por outro lado, proporciona a substituição de uma água de qualidade superior por outra de qualidade mínima necessária à atividade em questão (WEBER; CYBIS; BEAL, 2010b).

Para melhorar a qualidade da água cinza para reúso, são propostos diferentes tratamentos, desde processos simples, como filtros de areia, até processos mais complexos, como reatores biológicos.

¹Universidade Federal de Goiás - Catalão (GO), Brasil.

*Autor correspondente: heberdepaula@ufg.br

Recebido: 12/09/2016 - Aceito: 29/06/2017 - Reg. ABES: 169155

Cabe destacar que a maioria dos tratamentos é precedida por uma separação sólido-líquido, seguida de uma desinfecção como pós-tratamento (LI; WICHMANN; OTTERPOHL, 2009).

Segundo Couto *et al.* (2015), para diminuir a captação de água potável dos recursos hídricos e fazer o reúso da água cinza, podem ser aplicados processos físicos, químicos e biológicos no tratamento. De acordo com Pidou *et al.* (2008), os processos físicos e biológicos podem ser insuficientes para o tratamento, motivando então estudos sobre a utilização de processos químicos para alcançar os valores ótimos de qualidade para o reúso dessa água.

Os principais tratamentos químicos em águas cinza são trocas iônicas, coagulação e floculação (LI; WICHMANN; OTTERPOHL, 2009). Segundo Pidou *et al.* (2008), a coagulação empregando um segundo agente coagulante pode apresentar resultados satisfatórios, reduzindo a turbidez em 90%.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a coagulação é um processo químico que consiste na remoção de materiais suspensos. De acordo com Paula (2014), os coagulantes mais utilizados no tratamento de água são o sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$) e o cloreto férrico ($FeCl_3$).

Mesmo que a qualidade da água cinza já tenha sido caracterizada em outros trabalhos (BAZZARELA, 2005; JOKERST *et al.*, 2011; MARCH & GUAL, 2007; MERZ *et al.*, 2007), e a eficiência do uso de coagulantes químicos no tratamento tenha sido investigada (ANTONOPOULOU; KIRKOU; STASINAKIS, 2013), não foram encontrados estudos sobre o uso combinado ou associado do $Al_2(SO_4)_3$ e do $FeCl_3$ no tratamento dessas águas.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi otimizar o tratamento de água cinza, proveniente de chuveiro e lavatório, combinando os coagulantes químicos $Al_2(SO_4)_3$ e $FeCl_3$, propondo a utilização da água tratada como fonte alternativa de abastecimento.

METODOLOGIA

Este estudo baseou-se em uma pesquisa aplicada em que a água cinza utilizada foi coletada em quatro amostras, em dias distintos, de uma residência unifamiliar com três usuários, localizada na cidade de Catalão, Goiás.

A água cinza coletada foi retirada da caixa sifonada proveniente do chuveiro e do lavatório, ambos do banheiro da residência, mantida refrigerada a 4°C até 30 dias. As coletas foram realizadas em recipientes plásticos de 5 L, que foram desinfetados com hipoclorito de sódio 1% e, posteriormente, lavados com água destilada.

Vale ressaltar que as coletas foram realizadas entre os meses de maio e junho de 2016, em quatro ocorrências (C1 a C4). A primeira coleta (C1) foi utilizada para determinação das dosagens-base ou iniciais dos coagulantes químicos; a segunda (C2), para testar as dosagens definidas pelo delineamento composto central rotacional (DCCR); a terceira (C3), para determinar a dosagem ótima; e a última (C4), para validação da otimização do tratamento e das dosagens dos coagulantes frente aos parâmetros estudados.

Para o início do tratamento, foram preparados os coagulantes químicos — $Al_2(SO_4)_3$ (P.A., Quimidrol) e $FeCl_3$ (38%, Quimidrol) —, ambos em solução aquosa com concentração de 5%, o que corresponde a uma concentração mássica de 50 g.L⁻¹. As soluções foram utilizadas por 30 dias a partir do seu preparo e mantidas refrigeradas após seu uso.

A determinação das concentrações base ou iniciais dos coagulantes químicos foi tomada como referência à concentração mínima para a formação dos flocos (análise visual dos flocos). Foi adicionado 1 L de água cinza em um béquer e o conteúdo foi agitado magneticamente (agitador DiagTech, modelo DT3110H). Para o $Al_2(SO_4)_3$, a concentração variou de 0 a 20 mL.L⁻¹ (0 a 1,0 g.L⁻¹) em dosagens de 4 mL (0,2 g.L⁻¹), e para o $FeCl_3$, de 0 a 10 mL.L⁻¹ (0 a 0,5 g.L⁻¹) em dosagens de 2 mL (0,1 g.L⁻¹). A análise visual de formação dos flocos foi realizada um minuto após a adição do coagulante, e os resultados possibilitaram determinar um ponto de partida para o estudo de otimização. Destaca-se que foram realizados os ensaios para três amostras de cada coagulante separadamente (A1 a A3).

Para a determinação das faixas ótimas da associação dos coagulantes químicos no tratamento da água cinza, utilizou-se o DCCR, e para a análise de dados, a metodologia de superfície de resposta (MSR), sendo o objetivo determinar um valor ótimo para a variável resposta (GRIZOTTO *et al.*, 2005). Vale ressaltar que a MSR, quando aplicada corretamente, pode alcançar informações importantes com a menor quantidade de experimentos possíveis, conforme Poumaye *et al.* (2012).

O DCCR é um delineamento simétrico e de segunda ordem, formado por um ou mais pontos centrais e pontos axiais. Os pontos centrais (pontos de vértices) apresentam os efeitos principais lineares e todos os efeitos de interação de segunda ordem. Os experimentos realizados nos pontos axiais servem para estimar os efeitos quadráticos principais (RODRIGUES & IEMMA, 2009).

A matriz dos ensaios a serem realizados é gerada utilizando-se os seguintes valores codificados dos níveis dos fatores: baixo (-1), alto (+1), ponto central (0) e pontos axiais ($\pm\alpha$). O DCCR foi executado com 2 níveis originais, sendo 2^k (k=2 fatores; 2 níveis) pontos fatoriais, mais 2 x k pontos axiais e mais um número arbitrário de pontos centrais.

O nível alto foi estipulado como a concentração de coagulante necessária para a formação de flocos bem estruturados em ensaio no agitador magnético. Para o ponto axial baixo, determinou-se a ausência de coagulante.

As variáveis independentes foram as dosagens dos coagulantes $Al_2(SO_4)_3$ (X_1) e $FeCl_3$ (X_2). As variáveis dependentes estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis dependentes avaliadas.

Variável	Parâmetro (unidade)
Y_1	pH
Y_2	Turbidez residual (UNT)
Y_3	Volume de lodo (mL.L ⁻¹)

Cada resposta Y_i foi representada matematicamente por meio de modelos de regressão do tipo apresentado pela Equação 1:

$$Y = \beta_0 \sum_{i=1}^2 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

Em que:

Y = resposta predita;

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ = parâmetros do modelo de regressão.

A definição da faixa ótima correlaciona-se com as variáveis independentes, que são adotadas de modo a maximizar a desejabilidade global, que corresponde à média geométrica das m desejabilidades individuais, de acordo com a Equação 2.

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_m)^{1/m} \quad (2)$$

Para analisar a desejabilidade global dos resultados, utilizou-se a escala de Harrington (RIBARDO & ALLEN, 2003), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação da desejabilidade global, de acordo com Harrington.

Desejabilidade	Descrição
1,00	Máximo em satisfação e qualidade (uma melhoria para além deste ponto não teria valor considerável)
1,00-0,80	Aceitável e excelente (qualidade incomum ou desempenho bem além do que está disponível no mercado)
0,80-0,63	Aceitável e bom (avanço em relação à melhor qualidade comercial)
0,63-0,40	Aceitável, mas pobre (qualidade é aceitável para os limites de especificação, mas a melhoria é desejável)
0,40-0,30	Limítrofe para as especificações mínimas ou máximas
0,30-0,00	Inaceitável (possível ocorrência de falhas)
0,00	Completamente inaceitável

Fonte: Ribardo e Allen (2003).

Para elaborar as superfícies de resposta, os gráficos de Pareto e de contorno e os modelos de regressão das variáveis independentes utilizou-se o *software* Statistica® 10.0.

Para o teste de coagulação (determinada para cada ensaio proposto pelo DCCR) foi utilizado o equipamento *Jar Test* (Milan®, modelo JT-203/6) com seis cubas, e cada amostra contendo 1 L de água cinza. Como não tem padrão de rotação para este ensaio, foram analisados os estudos de Selcuk (2005), Crittenden *et al.* (2005) e Paula, Ilha e Andrade (2016), que definem os ciclos de acordo com o coagulante. O ciclo de aplicação dos coagulantes foi o mesmo proposto por Paula, Ilha e Andrade (2016), adotando as seguintes velocidades: 100 rpm ($1,67s^{-1}$) durante 2 min para rotação rápida, seguida de uma mistura lenta de 20 min a 40 rpm ($0,67s^{-1}$). Os coagulantes químicos foram colocados simultaneamente nos recipientes com água cinza a ser tratada, imediatamente após o início do teste. Além disso, o tempo para o processo de sedimentação após o término do ensaio foi de 60 min, e após esse período foram analisados os parâmetros de turbidez, pH e volume de lodo.

Para a análise dos dados e a caracterização da água residuária foram verificados três parâmetros: turbidez (pelo turbidímetro modelo DLT-WV, da marca Del Lab®), pH (pelo medidor de pH modelo HI 981401N, HANNA®) e cloro residual (pelo fotolorímetro modelo AT 100P II, Alfakit®).

Para avaliar a água tratada foi considerada a remoção de turbidez, sendo comparados os resultados da amostra de referência e a água submetida ao tratamento completo. Os outros parâmetros analisados foram pH e volume de lodo. A partir do tratamento otimizado, foram considerados, além dos parâmetros já mencionados, o cloro residual e os coliformes termotolerantes. Vale ressaltar que todos os ensaios foram realizados em triplicatas e comparados com uma amostra de referência, sem tratamento.

Os limites aceitáveis para os parâmetros de qualidade, considerando o reúso da água cinza tratada, foram definidos a partir da Norma Brasileira (NBR) nº 13969 (ABNT, 1997) e de Sauthuk *et al.* (2005), como apresentados na Tabela 3. Vale destacar que os trabalhos adotados como referência definem os parâmetros para reúso de acordo com as classes vistas na Tabela 4.

Tabela 3 – Parâmetros para reúso da água, segundo NBR nº 13969 (ABNT, 1997) e Sauthuk *et al.* (2005).

Referência	Classes	Parâmetros			
		Turbidez (UNT)	pH	Cloro residual (mg.L ⁻¹)	Coliformes fecais (NMP/100 mL)
NBR nº 13.969 (ABNT, 1997)	Classe 1	<5,0	6,0 e 8,0	0,5 e 1,5	<200
	Classe 2	<5,0	-	<0,5	<500
	Classe 3	<10,0	-	-	<500
	Classe 4	-	-	-	<5000
Sauthuk <i>et al.</i> (2005)	Classe 1	≤2,0	6,0 e 9,0	≤0,5	-
	Classe 2	-	6,0 e 9,0	-	≤1000
	Classe 3	<5,0	6,0 e 9,0	≤1,0	≤200/100 mL

NBR: norma brasileira.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização da água cinza

Os resultados referentes aos parâmetros de qualidade da água cinza, obtidos por meio de análises em laboratório, são apresentados na Figura 1. A Figura 1A apresenta os resultados referentes à turbidez, cujo valor médio, considerando todas as coletas, foi de 155,60 UNT. Os valores obtidos para esse parâmetro foram semelhantes para todas as coletas, e a explicação para esse resultado é que não houve alteração entre os usuários das instalações e nenhuma atividade que comprometesse a qualidade da água cinza. Vale destacar que cada ensaio foi realizado em triplicata, calculando-se a média e o respectivo desvio padrão. Contudo, o desvio padrão não apresentou uma variação significativa em nenhum dos ensaios, o que representa uma uniformidade entre as amostras.

Para parâmetros como a turbidez, a faixa de concentração, conforme a literatura, é ampla, variando de 20 UNT (MARCH & GUAL,

Tabela 4 - Classes e destinos ao reúso, de acordo com a NBR nº 13969 (ABNT, 1997).

Classes	Destinos (NBR nº 13969 – ABNT, 1997)
Classe 1	Lavagem de veículos e outros usos que requerem contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador incluído chafarizes.
Classe 2	Lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes.
Classe 3	Reúso na descarga das bacias sanitárias.
Classe 4	Reúso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos por meio de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.
Classes	Destinos (SAUTHUK et al., 2005)
Classe 1	Descarga de vasos sanitários, lavagem de pisos, fins ornamentais, lavagem de roupas e veículos.
Classe 2	Lavagem de agregados, preparação de concretos, compactação de solos e controle de poeira.
Classe 3	Irrigação de áreas verdes e rega de jardins, irrigação superficial e/ou com aspersores.

NBR: norma brasileira.

2007) a 373 UNT (FIORI; FERNANDES; PIZZO, 2005), confirmando os estudos de Eriksson *et al.* (2002), no qual é destacado que a qualidade da água cinza pode variar conforme as características da água distribuída, do tipo de distribuição na edificação e com as atividades em que a água é utilizada pelos usuários da residência.

A Figura 1B mostra os valores obtidos para o pH das quatro coletas, sendo o valor médio 7,1 próximo ao pH neutro. Esse parâmetro apresentou uma pequena variação, que não foi estatisticamente significativa, mantendo uma faixa entre 7,0 e 7,3.

O último parâmetro analisado para caracterização da água cinza foi o cloro residual (Figura 1C), determinando-se um valor médio de 2,94 mg.L⁻¹. Destaca-se uma variação nesse parâmetro, provavelmente ocorrida pela qualidade da água distribuída pela concessionária.

Vale ressaltar que as características encontradas na água cinza monitorada apresentam parâmetros cujos valores foram semelhantes aos de Bazzarela (2005), e em relação aos estudos internacionais há uma grande variação, principalmente na turbidez, confirmando a sugestão de Eriksson *et al.* (2002) de que as características de águas cinzas podem variar conforme a qualidade da água fornecida e o modo como é utilizada.

Analisando-se os valores obtidos e relacionando-os com a NBR nº 13969 (ABNT, 1997), nota-se que há uma necessidade de tratamento a fim de tornar possível o reúso da água para fins não potáveis, sendo fundamental a correção da turbidez e do cloro residual. Em resumo, verificou-se que alguns parâmetros excederam os valores limites de referência para o reúso da água residuária (Tabela 5). Portanto, torna-se necessário um tratamento para possibilitar o uso não potável.

Otimização do tratamento combinado dos coagulantes químicos

A associação ou combinação dos coagulantes químicos, Al₂(SO₄)₃ e FeCl₃, foi realizada para potencializar e otimizar o tratamento da água cinza, visto que cada coagulante testado isoladamente não se mostrou eficaz na remoção de turbidez, por exemplo.

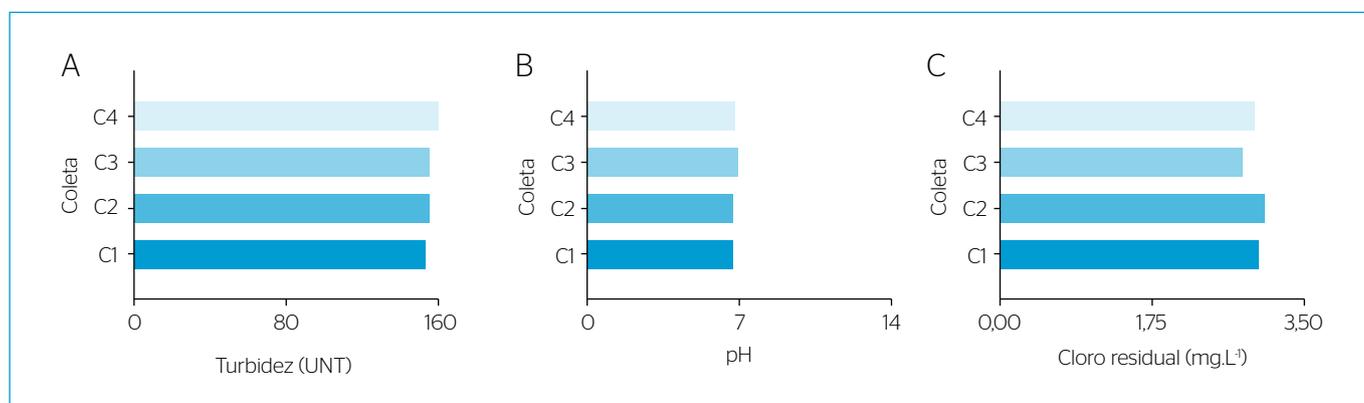


Figura 1 - Valores médios das amostras coletadas (C1 a C4) para (A) turbidez; (B) pH; e (C) cloro residual.

As Tabelas 6 e 7 apresentam o comportamento de formação de flocos referentes ao $Al_2(SO_4)_3$ e ao $FeCl_3$, respectivamente, considerando a adição dos coagulantes. Foi considerado como ideal o momento em que os flocos apresentavam uma formação mais estruturada. Assim, foi obtida a proporção de 16 mL.L^{-1} ($0,8\text{ g.L}^{-1}$) de $Al_2(SO_4)_3$ como ponto inicial para a definição da combinação dos coagulantes. De forma análoga, foi definido o volume para o $FeCl_3$: 4 mL.L^{-1} ($0,2\text{ g.L}^{-1}$).

A partir dos resultados dos ensaios de floculação, foram definidos como nível alto do delineamento 16 mL.L^{-1} ($0,8\text{ g.L}^{-1}$) para solução com

Tabela 5 - Parâmetros de qualidade da água cinza.

Parâmetro	Valor médio	Valor máximo nos documentos adotado como referência
Turbidez (UNT)	155,60*	<10
pH	7,10*	6,0 a 9,0
Cloro residual (mg.L^{-1})	2,94*	<0,5
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	33,00**	<5000

*calculado a partir dos resultados das quatro coletas (C1 a C4); **calculado a partir do resultado da quarta coleta (C4).

$Al_2(SO_4)_3$ e 4 mL.L^{-1} ($0,2\text{ g.L}^{-1}$) para solução com $FeCl_3$. Assim, os valores das variáveis independentes e seus respectivos níveis, apresentados na Tabela 8, geram a matriz de ensaios e de resposta das variáveis dependentes, conforme disposto na Tabela 9.

Tabela 9 - Delineamento experimental e resultados encontrados.

Ensaio	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3
1	1	1	5,4	14,3	117,6
2	1	1	4,6	11,9	147,0
3	1	1	3,5	56,2	137,2
4	1	1	3,5	57,0	137,2
5	-1	1	3,7	45,3	78,40
6	-1	1	4,2	45,2	117,6
7	-1	1	4,8	9,99	117,6
8	-1	1	3,4	46,0	196,0
9	0	1	5,6	12,4	39,20
10	0	1	5,5	11,0	19,60
11	0	1	5,4	11,5	19,60
12	0	1	5,5	11,2	39,20
13	0	1	5,5	11,2	39,20

Y_1 : pH; Y_2 : turbidez residual (UNT); Y_3 : volume de lodo (mL.L^{-1}).

Tabela 6 - Comportamento de floculação da água cinza em função da adição de sulfato de alumínio.

Dosagens (mL.L^{-1})	Amostras		
	A1	A2	A3
4,00			
8,00			
12,00			
16,00			
20,00			

Branco: não formação de flocos; azul-claro: início da formação de flocos; azul-escuro: formação de flocos bem estruturados.

Tabela 7 - Comportamento de floculação da água cinza em função da adição de cloreto férrico.

Dosagens (mL.L^{-1})	Amostras		
	A1	A2	A3
2,00			
4,00			
6,00			
8,00			
10,00			

Azul-claro: início da formação de flocos; azul-escuro: formação de flocos bem estruturados.

Tabela 8 - Variáveis independentes e respectivos níveis.

Variáveis independentes		Níveis considerados das dosagens (mL.L^{-1})				
		$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
X_1	$Al_2(SO_4)_3$	0,0	2,7	9,3	16,0	18,8
X_2	$FeCl_3$	0,0	0,7	2,4	4,0	4,7

Para as respostas das variáveis dependentes foram determinados os coeficientes de regressão polinomial de segunda ordem para os respectivos modelos (Tabela 10), os quais foram usados na geração das

Tabela 10 - Modelos de regressões polinomiais de segunda ordem ajustados para cada variável dependente.

Modelos ajustados	R ² (%)
$Y_1 = 4,07 + 0,26 \cdot 0,016 x_1^2 + 0,56 x_2 - 0,24 x_2^2$	94,32
$Y_2 = 37,43 + 7,20 x_1 + 0,37 x_1^2 + 2,87 x_2^2$	96,34
$Y_3 = 0,91 - 0,06 x_1 + 0,004 x_1^2 - 0,48 x_2 + 0,12 x_2^2$	94,88

R²: coeficiente de determinação.

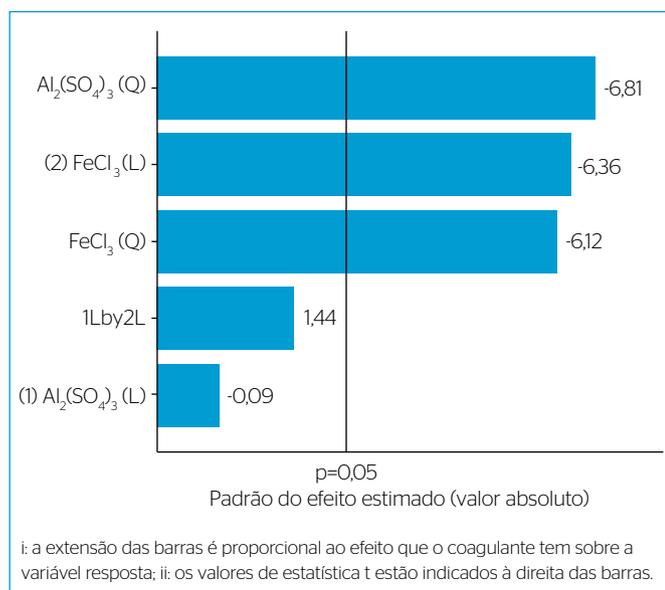


Figura 2 - Gráfico de Pareto para verificação da redução de pH, por meio do delineamento composto central rotacional, para os dois coagulantes em estudo.

superfícies de resposta, dos gráficos de Pareto e de contorno e da função desejabilidade global. Destaca-se que os valores determinados para os coeficientes dos modelos foram estatisticamente significantes a níveis de confiança acima de 94% e que os valores de R² foram superiores a 94%, indicando que os ajustes dos modelos foram de boa qualidade.

O gráfico de Pareto é apresentado na Figura 2 com a indicação das variáveis significativas (p<0,05), verificando que o efeito linear (L) do Al₂(SO₄)₃ e os efeitos linear (L) e quadrático (Q) do FeCl₃ foram considerados significativos para a redução do pH, observados pelo sinal negativo.

A superfície de contorno para a variável pH é mostrada na Figura 3, notando um efeito significativo das variáveis independentes. Cabe destacar que a utilização dos coagulantes químicos em maiores concentrações reduz o pH da água cinza durante o tratamento. Na Figura 3, pode-se constatar que a região referente à cor vermelha representa os valores de pH acima de 5, que são aceitáveis para o reúso não potável, e a referente à cor verde, os valores abaixo de 2, que neste caso impossibilita o reúso da água residuária tratada.

Para obter os valores ótimos ajustou-se o modelo de regressão para a variável dependente pH (Tabela 10), podendo assim, a partir do modelo ajustado, realizar a análise das condições para otimização das variáveis independentes (Al₂(SO₄)₃ e FeCl₃).

Para o reúso não potável, é necessário que a faixa de pH esteja entre 6,0 e 9,0, dependendo da finalidade requerida (no presente caso, a água cinza possui pH 7,1). Contudo, observou-se que o Al₂(SO₄)₃ e o FeCl₃ apresentaram efeitos quadráticos negativos, ou seja, quanto mais destes dois coagulantes químicos for adicionado ao tratamento, menor será o pH, impossibilitando o reúso da água cinza tratada para alguns fins.

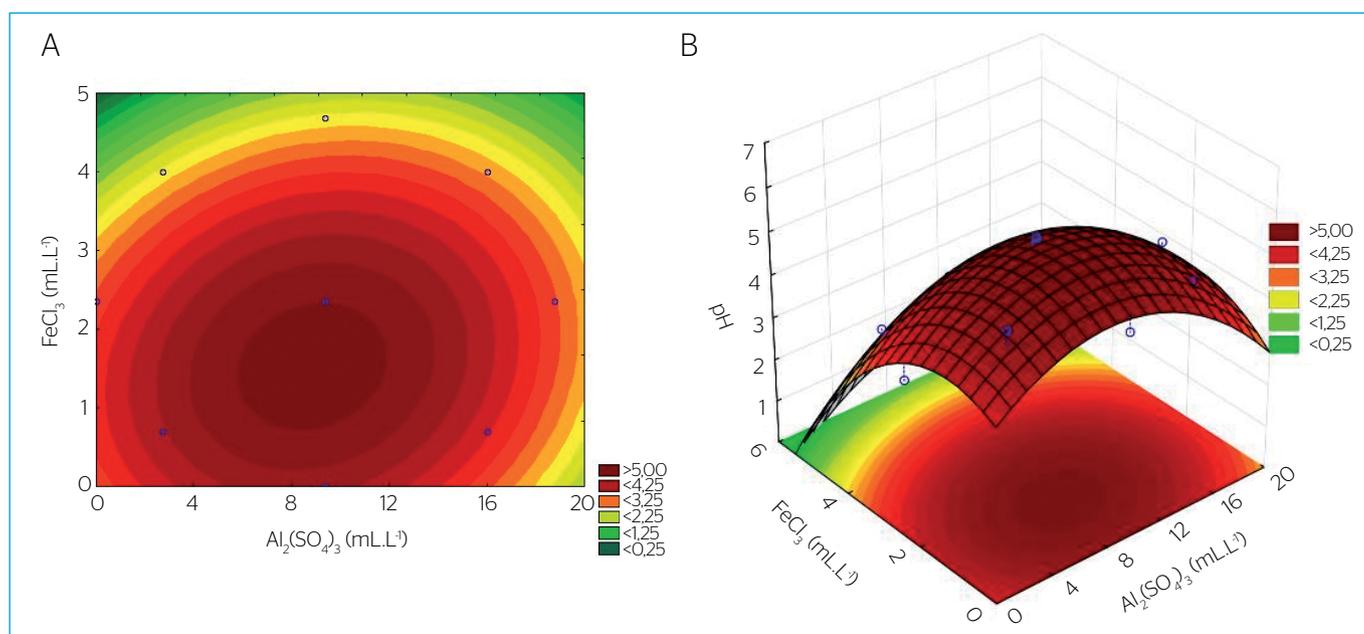


Figura 3 - Superfície de contorno para a variação de pH em função das variáveis independentes (a região referente à cor vermelha indica o pH acima de 5, que possibilita o uso para fins não potável).

Nas Figuras 4, 5 e 6 estão apresentados os gráficos de Pareto para nível de significância de 5% e os gráficos de contorno e superfície de respostas, respectivamente.

Com relação à turbidez (Y_2), o $Al_2(SO_4)_3$ teve efeito linear (L) significativo, conforme visto nas Figuras 4A e 5, enquanto o $FeCl_3$ apresenta pouca eficiência para a redução da turbidez. Cabe destacar que a adição de $FeCl_3$ faz com que parte da quantidade de íons ferro fique livre na solução, dificultando a diminuição da turbidez. Contudo, é possível obter valores mais baixos de turbidez utilizando concentrações de $FeCl_3$ entre 0,0 e 2,4 mL.L⁻¹ (0,115 g.L⁻¹).

Entre os ensaios realizados, a turbidez variou entre 9,99 e 57,0 (UNT), e apesar de não ter alcançado os valores desejados para o reúso neste estágio do estudo, a remoção foi acima de 92% na melhor dosagem.

Segundo Paula, Ilha e Andrade (2016), o processo de coagulação gera grande volume de lodo que ocasiona uma preocupação com o seu descarte. Nesse caso, o excesso dos coagulantes poderia gerar um maior volume de lodo no tratamento, visto o efeito quadrático de ambos (Figura 4B). Como pode ser visto na Figura 6, há uma zona na qual possivelmente haverá uma menor formação de lodo, que seria entre 5 e 12 mL.L⁻¹ de $Al_2(SO_4)_3$ e entre 1,5 e 2,5 mL.L⁻¹ de $FeCl_3$. Para os ensaios realizados, o volume de lodo variou entre 19,6 e 196,0 mL.L⁻¹. Dessa forma, a desejabilidade (Figura 7) foi para o menor valor, 19,6 mL.L⁻¹.

Para definir as concentrações a serem utilizadas no tratamento da água cinza, analisou-se a desejabilidade global, isto é, a partir dos melhores resultados estimados das variáveis dependentes foram

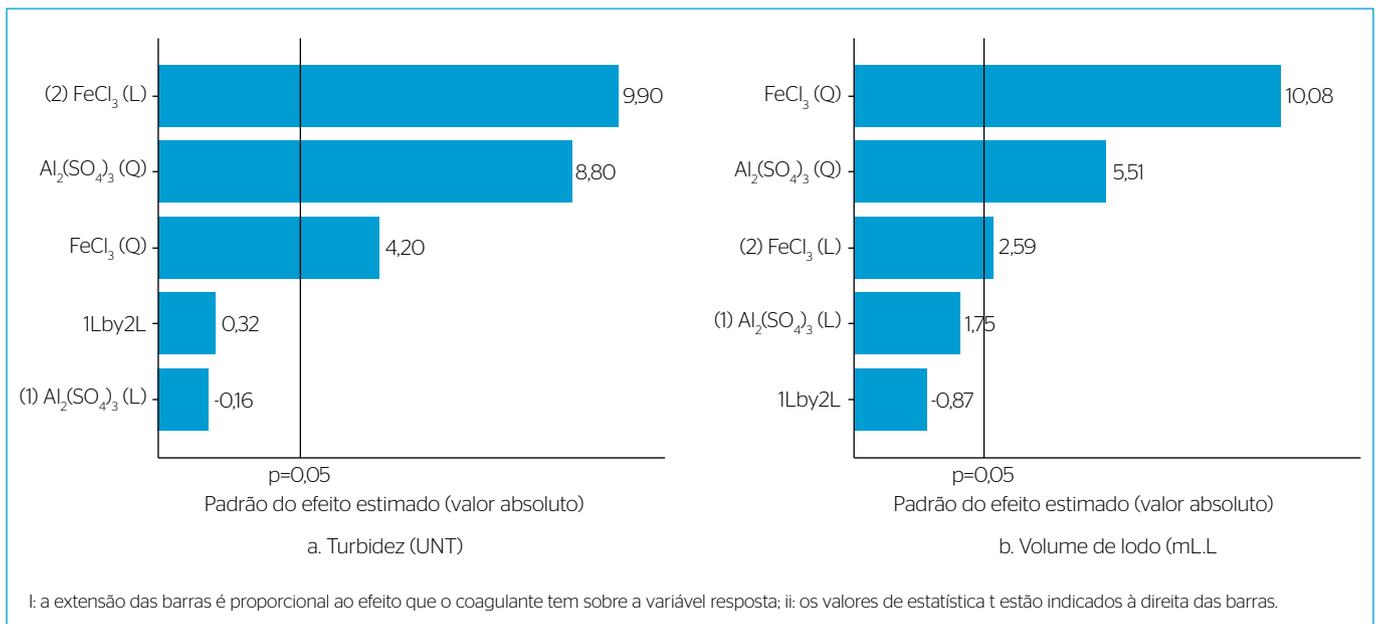


Figura 4 - Gráfico de Pareto para as variáveis dependentes obtidas a partir do delineamento composto central rotacional para os dois coagulantes em estudo.

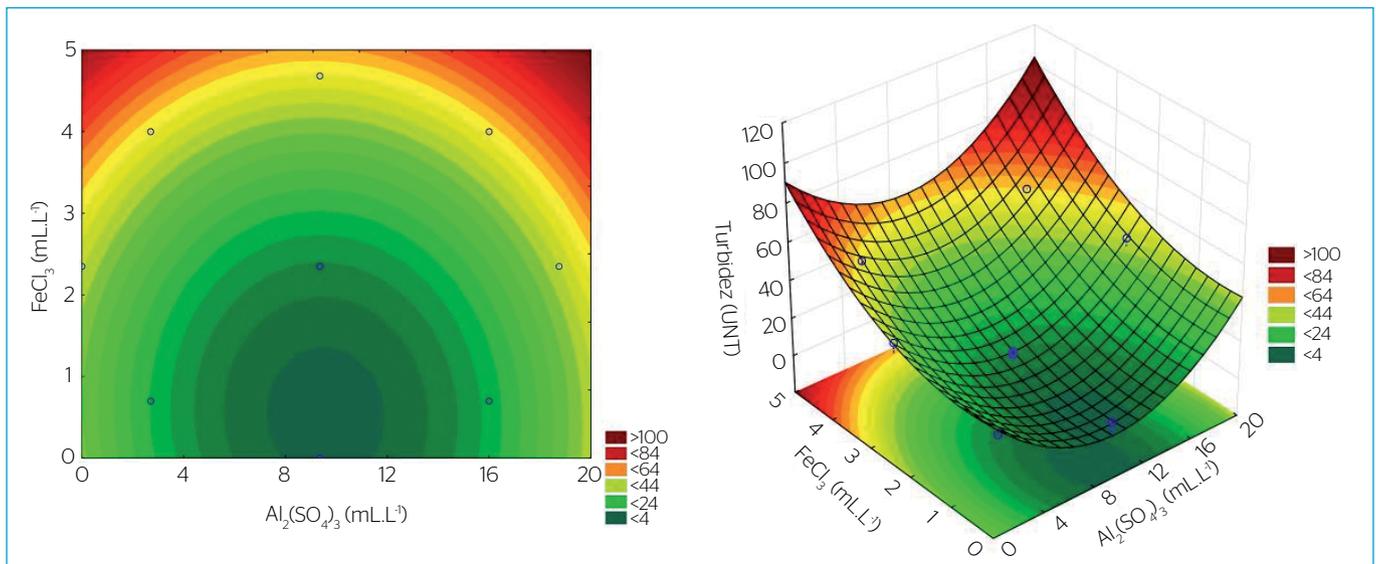


Figura 5 - Superfície de contorno para a variação da turbidez em função das variáveis independentes.

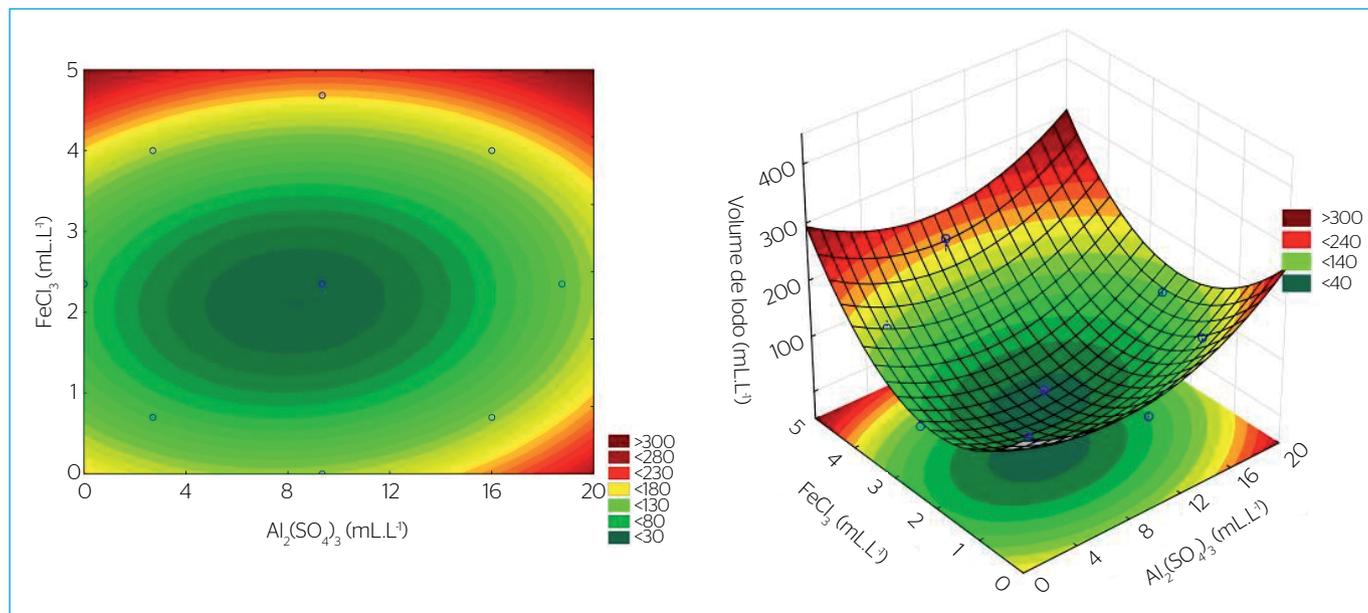


Figura 6 - Superfície de contorno para a variação do volume de lodo em função das variáveis independentes.

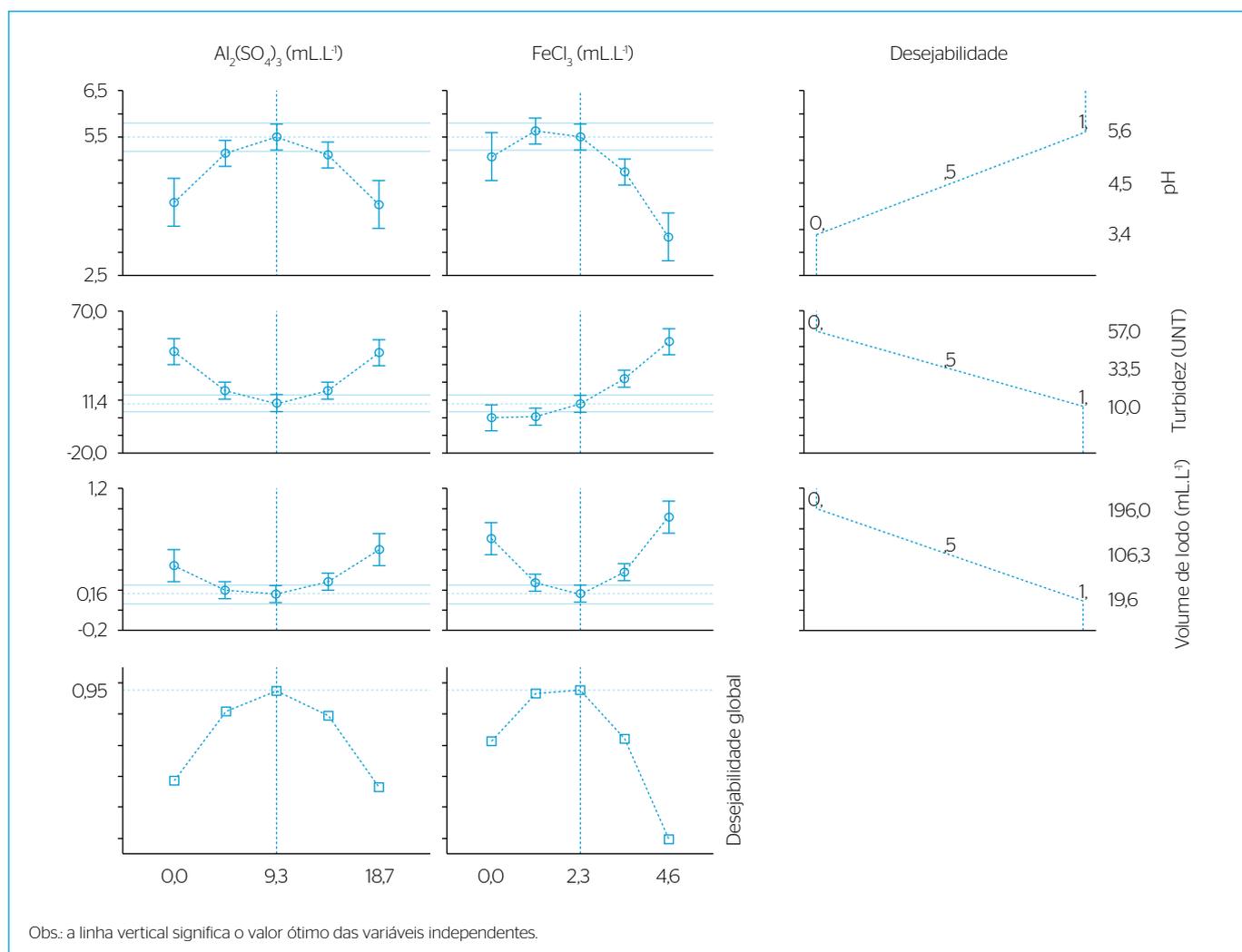


Figura 7 - Perfis dos valores preditos e a função de desejabilidade considerando todos os parâmetros analisados simultaneamente.

determinadas as melhores faixas de concentração dos coagulantes. A Figura 7 demonstra o resultado da análise de desejabilidade global para o tratamento sugerido.

Verifica-se que o valor para a desejabilidade global foi de 0,95, e conforme a Tabela 4 (Classificação de Harrington), este valor classifica-a como aceitável e excelente, obtendo uma qualidade incomum e um desempenho bem além do disponível no mercado. Com os valores da desejabilidade global, determinaram-se quatro faixas de concentrações para uma bateria de ensaio, com o objetivo de determinar a dosagem ótima. O valor máximo adotado, tanto para o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ quanto para o FeCl_3 , foi a maior dosagem no gráfico da desejabilidade global, e o mínimo, o menor valor, além do valor indicado como ótimo (Figura 7). Dessa forma, foram testadas quatro faixas específicas de concentrações dos coagulantes, sendo:

1. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: 9,4 mL.L⁻¹ (0,470 g.L⁻¹); FeCl_3 : 2,3 mL.L⁻¹ (0,115 g.L⁻¹);
2. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: 9,4 mL.L⁻¹ (0,470 g.L⁻¹); FeCl_3 : 1,2 mL.L⁻¹ (0,06 g.L⁻¹);
3. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: 9,4 mL.L⁻¹ (0,470 g.L⁻¹); FeCl_3 : 0,0 mL.L⁻¹ (0,00 g.L⁻¹);
4. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: 18,75 mL.L⁻¹ (0,937 g.L⁻¹); FeCl_3 : 0,0 mL.L⁻¹ (0,00 g.L⁻¹);

Avaliação da eficiência do tratamento proposto

Com as concentrações definidas, foram realizados os ensaios de tratabilidade, e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 11, comparando-os com os valores da água cinza sem tratamento e com os valores preditos pela desejabilidade de cada parâmetro.

Na primeira dosagem, os valores para a turbidez e o pH estão próximos aos preditos, enquanto o volume de lodo apresenta uma discrepância significativa. Destaca-se que a turbidez apresentou uma redução de 94,4% em comparação com a água cinza sem tratamento, superando os valores preditos para esse parâmetro, que foi de 93,57%.

As outras dosagens apresentaram valores satisfatórios para alguns parâmetros, mas para a escolha da dosagem ótima foi considerado o parâmetro de turbidez e, nesse sentido, a primeira dosagem atingiu o melhor resultado. Portanto, para validar os resultados, foram realizadas seis repetições para a combinação: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: 9,4 mL.L⁻¹ (0,470 g.L⁻¹) e FeCl_3 : 2,3 mL.L⁻¹ (0,115 g.L⁻¹).

Ressalta-se que para os seis ensaios de validação, além do monitoramento da turbidez, do pH e do volume de lodo, foram avaliados

o cloro residual e os coliformes termotolerantes. A Tabela 12 apresenta os resultados preditos (modelados) e os obtidos com o tratamento proposto (em laboratório), além dos valores da água cinza sem o tratamento.

O estudo realizado por Kim *et al.* (2007) apresentou uma redução de 74,60% da turbidez da água cinza utilizando filtro. Antonopoulou, Kirkou e Stasinakis (2013), utilizando o processo de coagulação com o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, verificaram que o pH se reduziu de 7,23 para 4,85, para uma concentração de coagulante de 0,8 g.L⁻¹, removendo 79% de sólidos totais. No presente estudo, houve um consumo total de coagulantes químicos de 0,585 g.L⁻¹ para uma remoção de turbidez de 94,24% e redução de pH de 7,1 para 5,6. Vale destacar que o tratamento sob condições otimizadas diminuiu, consideravelmente, o cloro residual em 85% e os coliformes termotolerantes em 100%. Acredita-se que esse efeito foi causado pela sedimentação dos flocos em conjunto, efeito conhecido como varredura.

Como já mencionado, o processo de coagulação gera um grande volume de lodo. Paula (2014) conduziu o tratamento da água residual de uma usina de concreto associando os coagulantes químicos $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ e FeCl_3 em conjunto com o coagulante natural *Moringa oleifera*, e verificou a geração de um volume de lodo de 83,54 mL.L⁻¹, próximo ao obtido no tratamento otimizado aqui reportado (Tabela 12).

O tratamento aplicado, conforme os resultados apresentados na Tabela 12, reduziu a turbidez a valores ideais para o reúso da água em descarga de bacias sanitárias (Classe 3 — NBR nº 13969) e para irrigação por sistemas pontuais (Classe 4 — NBR nº 13969). Por outro lado, os limites estabelecidos por Sauthuk *et al.* (2005) para pH e turbidez não foram atendidos em nenhuma das classes, porém coliformes termotolerantes e cloro residual atenderam as três classes. O valor de pH

Tabela 12 - Resultados preditos e obtidos após o tratamento proposto.

Parâmetro	Água residual	Predito	Tratamento
Turbidez (UNT)	155,6	9,99	8,95
pH	7,10	5,60	5,20
Volume de lodo (mL.L ⁻¹)	-	19,6	88,2
Cloro residual (mg/L)	2,94	-	0,42
Coliformes termotolerantes (NMP/100 mL)	33,0	-	0,00

Tabela 11 - Resultados preditos e obtidos após o tratamento para cada dosagem combinada de coagulantes.

Parâmetro	Água cinza	Predito ou modelado	Dosagem			
			1	2	3	4
Turbidez (UNT)	155,60	9,99	8,89	11,50	13,3	12,6
pH	7,10	5,60	5,20	5,70	6,10	5,90
Volume de lodo (mL.L ⁻¹)	-	19,60	98,00	117,60	176,4	137,2

poderia ser facilmente corrigido com uso de uma pequena dosagem de alcalinizante, e a turbidez residual poderia ser removida mediante a utilização de um filtro, tornando possível o reúso da água cinza tratada para outros fins, como a lavagem de veículos e de pisos.

Os resultados apontam a viabilidade do reúso da água cinza, principalmente, por beneficiar o meio ambiente por meio da redução das cargas poluentes emitidas ao corpo receptor e dos volumes de água captada (WEBER *et al.*, 2010a).

CONCLUSÕES

A água cinza pode ser uma fonte alternativa importante para o suprimento de água em períodos de escassez. A análise da qualidade da água cinza indicou, contudo, que há necessidade de tratamento para possibilitar o seu reúso não potável.

A aplicação do DCCR em conjunto com a MSR e a análise de desejabilidade global foram importantes para a otimização do tratamento, permitindo que com um menor número de dados fosse possível avaliar um maior espaço experimental para as concentrações de coagulantes empregados no tratamento. De modo geral, observou-se que a associação dos coagulantes químicos pode resultar numa melhora da qualidade da água cinza, o que pode ser comprovado pela análise de desejabilidade global (D) do tratamento, critério que foi considerado como aceitável e excelente, atingindo um valor de 0,95 na escala de Harrington e corroborado por testes experimentais.

A melhor dosagem encontrada ou otimizada para a água cinza foi 9,4 mL.L⁻¹ (0,470 g.L⁻¹) de Al₂(SO₄)₃ e 2,3 mL.L⁻¹ (0,115 g.L⁻¹) de

FeCl₃, comprovada pela proximidade dos resultados preditos (modelados) com os obtidos experimentalmente para os parâmetros de turbidez, pH e volume de lodo. Com esse tratamento, foi possível obter uma redução de aproximadamente 37% do consumo de coagulantes químicos, se comparado com o de Antonopoulou, Kirkou e Stasinakis (2013), e uma remoção de turbidez acima de 94%. A partir das concentrações, estima-se que o custo de coagulantes para o tratamento de 1.000 L de água cinza seria de US\$ 1,48, o que gera economia de 46% em relação aos valores encontrados pelos autores citados anteriormente.

Por meio do processo de coagulação-floculação, constatou-se melhora significativa na qualidade da água residuária, alcançando os limites necessários para o reúso em atividades que não exigem água potável. A combinação dos coagulantes químicos potencializou o tratamento e, com esse processo, verificou-se uma remoção de impurezas por varredura, com a formação de flocos muito bem definidos e gerando volume máximo de lodo de 88,2 mL.L⁻¹. Esses resultados explicam a elevada remoção de turbidez, coliformes termotolerantes e cloro residual observada no tratamento.

Apesar de alguns parâmetros (pH, por exemplo) não terem atendido aos valores estabelecidos, o tratamento permitiu um avanço no conhecimento sobre a associação de coagulantes químicos para o tratamento de águas cinzas. Essa proposta de tratamento atingiu os limites para reúso na descarga de bacias sanitárias, conforme a NBR n° 13969 (ABNT, 1997), o que pode representar uma redução no consumo de água residencial de até 41%, conforme o consumo indicado pela USEPA (1992).

REFERÊNCIAS

ANTONOPOULOU, G.; KIRKOU, A.; STASINAKIS, A.S. (2013) Quantitative and qualitative greywater characterization in Greek households and investigation of their treatment using physicochemical methods. *Science of the Total Environment*, v. 454-455, p. 426-432. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.045>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1997) *NBR 13969: tanques sépticos: unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - projeto, construção e operação*. Rio de Janeiro: ABNT.

BARRETO, D. (2008) Perfil do consumo residencial e usos finais de água. *Ambiente Construído*, v. 8, n. 2, p. 23-40.

BAZZARELA, B.B. (2005) *Caracterização e aproveitamento de águas cinzas para usos não potáveis em edificações*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

BLANKY, M.; RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ, S.; HALPERN, M.; FRIEDLER, E. (2015) Legionella pneumophila: From potable water to treated greywater; quantification and removal during treatment. *Science of the Total Environment*, v. 533, p. 557-565. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.121>

COUTO, E.A.; CALIJURI, M.L.; ASSEMAN, P.; SANTIAGO, A.F.; LOPES, L.S. (2015) Greywater treatment in airports using anaerobic filter followed by UV disinfection: an efficient and low cost alternative. *Journal of Cleaner Production*, v. 106, p. 372-379. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.065>

CRITTENDEN, J.C.; TRUSELL, R.R.; HAND, D.W.; HOWE, K.J.; TCHOBANOGLOUS, G. (2005) *Water treatment: principles and design*. Estados Unidos: Wiley. 1968 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. (2005) *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2. ed. São Carlos: Ed. RiMa. v. 1. 792 p.

- ERIKSSON, E.; AUFFARTH, K.; HENZE, M.; LEDIN, A. (2002) Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, v. 4, n. 1, p. 85-104. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- FIORI, S.; FERNANDES, V.C.; PIZZO, H. (2005) Reúso de águas em edificações visando a sustentabilidade hídrica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE SISTEMAS PREDIAIS, 9, 2005, Goiânia. *Anais... Goiânia*. 1 CD ROM.
- GRIZOTTO, R.K.; BRUNS, R.E.; AGUIRRE, J.M.; BATISTA, G. (2005) Otimização via metodologia de superfície de respostas dos parâmetros tecnológicos para produção de fruta estruturada e desidratada a partir de polpa concentrada de mamão. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 25, n. 1, p. 158-164.
- JOKERST, A.; SHARVELLE, S.E.; HOLLOWED, M.E.; ROESNER, L.A. (2011) Seasonal performance of an outdoor constructed wetland for graywater treatment in a temperate climate. *Water Environment Research*, v. 83, p. 2187-2198.
- KIM, R.; LEE, S.; JEONG, J.; LEE, J.; KIM, Y. (2007) Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. *Desalination*, v. 202, p. 326-332. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.071>
- LI, F.; WICHMANN, K.; OTTERPOHL, R. (2009) Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the Total Environment*, v. 407, p. 3439-3449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>
- MARCH, J.G.; GUAL, M. (2007) Breakpoint chlorination curves of greywater. *Water Environment Research*, v. 79, p. 828-832.
- MERZ, C.; SCHEUMANN, R.; EL HAMOURI, B.; KRAUME, M. (2007) Membrane bioreactor technology for the treatment of greywater from a sports and leisure club. *Desalination*, v. 215, p. 37-43. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.10.026>
- PAULA, H.M. (2014) *Uso de Suspensões Preparadas com Sementes de Moringa Oleifera Associada a Coagulantes Químicos no Tratamento da Água Residuária de Usinas de Concreto*. 187f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- PAULA, H.M.; ILHA, M.S.O.; ANDRADE, L.S. (2016) Chemical coagulants and Moringa oleifera seed extract for treating concrete wastewater. *Acta Scientiarum*, v. 38, n. 1, p. 57-64. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v38i1.25699>
- PIDOU, M.; AVERY, L.; STEPHENSON, T.; JEFFREY, P.; PARSONS, S.A.; LIU, S.; MEMON, F.A.; JEFFERSON, B. (2008) Chemical solutions for greywater recycling. *Chemosphere*, v. 71, p. 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.10.046>
- POUMAYE, N.; MABINGUI, J.; LUTGEN, P.; BIGAN, M. (2012) Contribution to the clarification of surface water from the *Moringa oleifera*: Case M'Poko River to Bangui, Central African Republic. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 90, n. 12, p. 2346-2352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2012.05.017>
- RIBARDO, C.; ALLEN, T.T. (2003) An Alternative Desirability Function for Achieving "Six Sigma" Quality. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 19, n. 3, p. 227-240. <https://doi.org/10.1002/qre.523>
- RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. (2009) *Planejamento de Experimentos & Otimização de Processos*. 2. ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor. 358 p.
- SAUTHUK, C.; FARINA, H.; HESPANHOL, I.; OLIVEIRA, L.H.; COSTI, L.O.; ILHA, M.S.O.; GONÇALVES, O.M.; MAY, S.; BONI, S.S.N.; SCHMIDT, W. (2005) *Conservação e Reuso de água em Edificações*. São Paulo: Prol.
- SELCUK, H. (2005) Decolorization and detoxification of textile wastewater by ozonation and coagulation processes. *Dyes and Pigments*, v. 64, n. 3, p. 217-222. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2004.03.020>
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). (1992) *Guidelines for water reuse*. EPA/625/R-92/004. Washington, D.C.: Office of Water.
- UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (WWAP). (2015) *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris: UNESCO.
- WEBER, C.C.; CYBIS, L.F.; BEAL, L.L. (2010a) Conservação da água aplicada a uma indústria de papelão ondulado. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, n. 3, p. 291-300.
- WEBER, C.C.; CYBIS, L.F.; BEAL, L.L. (2010b) Reúso de água como ferramenta de revitalização de uma estação de tratamento de efluentes. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, n. 2, p. 119-128.