

Tratamento de água de lavagem de filtro de ETA empregando coagulante recuperado e desinfecção por radiação UV

Treatment of filter backwashing water from WTP using recovered coagulant and disinfection by UV radiation

- **Data de entrada:**
19/11/2018
- **Data de aprovação:**
03/02/2020

Andressa Filipaki^{1*} | Jeanette Beber de Souza¹ | Carlos Magno de Sousa Vidal¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.046>

ORCID ID

Filipaki A  <https://orcid.org/0000-0003-4199-8949>

Souza JB  <https://orcid.org/0000-0002-5375-512X>

Vidal CMS  <https://orcid.org/0000-0002-5839-5610>

Resumo

A produção de água potável nas estações de tratamento de água (ETA) gera resíduos que se constituem fontes de poluição ambiental, requerendo a implantação de sistemas de tratamento que visem ao seu melhor aproveitamento. O objetivo deste trabalho foi avaliar a tratabilidade da água de lavagem dos filtros (ALF) de uma ETA do tipo ciclo completo, por meio da aplicação de coagulante recuperado do lodo da própria estação e subsequente desinfecção empregando-se radiação ultravioleta (UV). Foi obtida concentração de 793,7 mg Al L⁻¹ a partir do coagulante recuperado, que aplicado na etapa de clarificação da ALF permitiu a redução da turbidez em 98% (30 mg Al L⁻¹). A eficiência da desinfecção foi avaliada por meio da inativação das bactérias indicadoras: *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens* e coliformes totais em doses que variaram de 49,6 a 297,3 mWs cm⁻², atingindo remoções de 1,3 log para *Escherichia coli*, 2,6 log para *Clostridium perfringens* e 2,0 log para coliformes totais.

Palavras-chave: Desinfecção UV. Água de lavagem de filtro. Recuperação de coagulante.

Abstract

Water treatment plants (WTP) generate residues, which are source of environmental pollution and require the implementation of treatment systems that result in a better use. The objective of this study was to evaluate the treatment of the filter backwashing water (FBWW) of a conventional WTP by applying recovered coagulant from the sludge of the own plant and subsequent disinfection, using ultraviolet radiation (UV). Concentration of 793,7 mg Al L⁻¹ was obtained from the recovered coagulant, which, when applied the FBWW in the clarification stage, resulted in 98% turbidity removal at 30 mg Al L⁻¹. The efficiency of disinfection was evaluated by the inactivation of indicator bacteria: *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens* and total coliforms at doses ranging from 49,6 to 297,3 mWs cm⁻², reaching 1,3 log removal for *Escherichia coli*, 2,6 log for *Clostridium perfringens* and 2,0 log for total coliforms.

Keywords: UV disinfection. Filter backwashing water. Coagulant recovery.

¹ Universidade Estadual do Centro-Oeste - Irati - Paraná - Brasil.

* **Autora correspondente:** filipaki.a@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Nos serviços públicos de abastecimento de água, esgotamento sanitário e drenagem pluvial urbana são gerados resíduos sólidos, cuja gestão é de responsabilidade dos geradores, no caso, os operadores dos sistemas. Esses resíduos constituem-se em resíduos classe II, ou seja, não perigosos (ABNT, 2004).

No Brasil, apesar do que preconiza a Lei 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), grande parte desses resíduos não recebe tratamento visando ao reaproveitamento dos recursos ou à disposição final ambientalmente adequada. Das Estações de Tratamento de Água (ETA) brasileiras que geram lodos (ETA com captação em poço subterrâneo não geram lodo), 67% afirmaram que encaminharam seus resíduos diretamente para cursos d'água (IBGE, 2010).

No Estado do Paraná (local onde foi realizado o estudo) estão em operação 169 ETA com geração aproximada de 20 mil t ano⁻¹ de matéria seca de lodo, sendo que dessas 77 possuem vazão de captação superior a 30 L s⁻¹, observando-se que, a partir de 2019, de acordo com o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná (PERS, PR, 2018), para estas ETA, o lodo gerado não poderá mais ser destinado diretamente aos corpos hídricos (Resolução SEMA 021/2009). Entretanto, a atual destinação dos lodos provenientes de 80% das ETA do Estado, com captação acima de 30 L s⁻¹, ainda ocorre diretamente nesses locais. Isso demonstra a importância de estudos relativos a essa temática e a necessidade de melhoria deste cenário em todo País.

Aproximadamente 70% da água tratada distribuída no Brasil é proveniente do sistema convencional de tratamento de água (ciclo completo), que compreende os processos de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, nos quais são gerados, em maior quantidade, os

lodos dos decantadores e a água de lavagem dos filtros (IBGE, 2011).

Os lodos dos decantadores caracterizam-se por apresentar elevada concentração de sólidos em suspensão, microrganismos, matéria orgânica, metais e outras substâncias que possam estar presentes na água bruta, predominantemente os hidróxidos de alumínio (Al) e ferro (Fe) formados na etapas de coagulação e floculação.

Uma das formas de reduzir significativamente o volume de resíduos gerados pelos decantadores e paralelamente prover um produto com potencial para reaproveitamento dos metais coagulantes se dá por meio da recuperação de coagulantes. Dos métodos empregados, a recuperação pela via ácida é um dos processos mais utilizados devido à facilidade de aplicação, à alta eficiência de recuperação e ao custo competitivo quando comparado aos sistemas tradicionais de tratamento de lodo (KEELEY et al., 2016; KEELEY, JARVIS e JUDD, 2012; XU et al., 2009; FREITAS, FERREIRA FILHO E PIVELI, 2005; GONÇALVES et al., 1999).

A solubilização ocorre por meio da variação do pH em condições ácidas (inferiores a 6), proporcionando a dissolução dos hidróxidos precipitados que ficam disponíveis em sua forma solúvel. Contudo, concomitantemente ocorre a solubilização de outros metais e demais impurezas que possam estar presentes na água bruta e retidas no lodo decantado. Com isso, cria-se uma limitação na aplicação de coagulantes recuperados quando comparadas as condições de pureza dos coagulantes comerciais. Nesse sentido, é crescente a sua aplicação em unidades de tratamento de águas residuais (JUNG et al., 2016; KEELEY et al., 2016; KEELEY, JARVIS e JUDD, 2012; XU et al., 2009; FREITAS, FERREIRA FILHO E PIVELI, 2005; De JULIO, 2011).

A água de lavagem dos filtros tem como características principais a presença de quantidades

significativas de carbono orgânico total, substâncias húmicas coloidais e precipitadas, sólidos suspensos, partículas de argila e silte, metais, compostos que podem provocar sabor e odor à água, bem como ligarem-se quimicamente a outros, gerando subprodutos da desinfecção (USEPA, 2011; GONÇALVES et al., 1999), além de microrganismos como bactérias, vírus e cistos de protozoários.

A partir da década de 1980 ganhou impulso a preocupação quanto à ocorrência dos protozoários patogênicos *Cryptosporidium* e *Giardia*. A ação pouco eficaz do cloro na inativação de oocistos e cistos, dentro das condições operacionais normalmente empregadas em uma ETA, também requer a maximização da sua remoção física, nos decantadores e filtros. Embora oocistos de *Cryptosporidium*, em especial, apresentem certas características morfológicas que dificultam sua remoção, almeja-se eficiência de 2 log de remoção na coagulação/floculação/sedimentação e outros 2 log de eficiência na filtração. Portanto, os oocistos e cistos removidos irão concentrar-se tanto no lodo dos decantadores como na água de lavagem dos filtros. Em regiões em que se tem escassez de água, ou em que o custo para transportar a água do manancial até a ETA seja elevado, fazem-se necessárias, ou interessante do ponto de vista econômico, a recuperação e a recirculação de água na própria estação (ISAAC, 2004).

Nesse sentido, a prática da recirculação da ALF visando a seu aproveitamento, bastante comum em diversas ETA, pode vir a reintroduzir microrganismos, particularmente oocistos de *Cryptosporidium* e cistos de *Giardia*, que podem afetar a qualidade final da água. Assim, o tratamento, especialmente a desinfecção da ALF, constitui prática imprescindível para o controle de microrganismos potencialmente patogênicos e, conseqüentemente, contribui sobremaneira com a proteção da saúde da população.

A radiação UV é uma tecnologia segura, de grande simplicidade operacional e custo competitivo a outras formas de desinfecção. Contudo, sua aplicação requer água com baixa concentração de partículas em suspensão.

Em termos volumétricos, em uma ETA de ciclo completo, os resíduos gerados podem compreender de 3 a 10 % da água produzida no sistema (CHEN et al., 2015). Fator este que depende diretamente das características da água bruta, da coagulação, dos produtos químicos adicionados, dos métodos operacionais empregados, dentre outros (DI BERNARDO, DANTAS e VOLTAN, 2012).

Diante disso, tornam-se necessárias soluções que viabilizem o aproveitamento desses recursos de forma econômica, tecnológica e ambientalmente segura em atendimento à legislação ambiental principalmente em locais de risco de oferta hídrica, sem que haja risco de comprometimento da saúde pública.

A proposta da presente pesquisa é a aplicação de coagulante recuperado na sedimentação quimicamente assistida, visando avaliar a tratabilidade da ALF e sua posterior desinfecção com emprego da radiação ultravioleta.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A etapa experimental da pesquisa foi realizada em escala de bancada de laboratório empregando-se o lodo do decantador e a água de lavagem dos filtros provenientes de uma ETA com operação em ciclo completo, composta pelas unidades de coagulação, floco-decantação, filtração, desinfecção e fluoretação, utilizando o cloreto de polialumínio (PAC) como coagulante.

Para o desenvolvimento da pesquisa, as coletas de lodo foram realizadas nos floco-decantadores circulares, que operavam com descargas semanais de lodo e as coletas da água de lavagem de filtros

foram realizadas em quatro filtros rápidos descendentes de leito misto (areia e antracito) com carreira de filtração de 48 h e tempo de lavagem de 6 minutos. A amostra composta de ALF foi gerada a partir das coletas de início, meio e fim das lavagens.

A execução da pesquisa ocorreu em três etapas: na etapa I procedeu-se a recuperação do coagulante (por via ácida) a partir do lodo do decantador; na etapa II, o coagulante recuperado foi aplicado por ocasião dos ensaios de tratabilidade da

ALF realizada em Jar Test, simulando as etapas de coagulação/floculação/sedimentação; e na etapa III, foi realizada a desinfecção da ALF já clarificada, empregando-se radiação ultravioleta.

As análises físico-químicas para caracterização das amostras de lodo, de ALF bruta e tratadas seguiram as determinações metodológicas preconizadas na 23ª edição do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA e WEF, 2017), especificadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros analisados, métodos analíticos e equipamentos empregados na pesquisa.

Parâmetro	Método analítico e equipamento utilizado	Número do método segundo APHA (1999)
pH	Potenciométrico com eletrodo combinado - Peagâmetro PHS-3B, PHTEK	4500-H'B
ABS254	Filtração em membrana de acetato (0,45nm) - Absorção Ultravioleta em cubeta de quartzo em espectrofotômetro - Espectrofotômetro UV-Vis DR 6000, Hach	5910B
Temperatura	Termometria com filamento de mercúrio	2550B
Condutividade elétrica	Condutivimétrica - Condutivímetro, 9867, TecnoPON	2510B
Turbidez	Nefelométrico - Turbidímetro 2100Q, Hach	2130B
Cor aparente	Espectrofotometria - Espectrofotômetro UV-Vis DR 6000, Hach	2120C
Cor verdadeira	Espectrofotometria - Espectrofotômetro UV-Vis DR 6000, Hach	2120C
DQO	Colorimétrico - Espectrofotômetro UV-Vis DR 6000, Hach	5220D
Sólidos totais - ST	Gravimetria	2540B
Sólidos totais Fixos - STF	Gravimetria	2540E
Sólidos Totais Voláteis - STV	Gravimetria	2540E
Sólidos Suspensos Totais - SST	Gravimetria	2540D
Al	Espectrometria de absorção atômica com chama - Espectrômetro de Absorção Atômica com Chama (FAAS), SpectraAA-220, Varian	3111
Fe total	Colorimétrico / Método do Tiocianato - Espectrofotômetro UV-Vis DR 6000, Hach	(1)
Mn total	Colorimétrico / Método da Formaldoxima - Espectrofotômetro UV-Vis DR 6000, Hach	(2)
<i>Escherichia coli</i>	Membrana filtrante	9222
Coliformes totais - CT	Membrana filtrante	9222
<i>Clostridium perfringens</i>	Técnica dos tubos múltiplos para determinação do número mais provável	(3)

Nota: (1) Merck (19--); (2) FRIES e GETROST (1977); (3) CETESB (1993).

2.1 Etapa I - Recuperação do coagulante do lodo do decantador da ETA estudada

Para a recuperação do coagulante presente no lodo do decantador, utilizou-se a solubilização por via ácida, por meio da adição controlada de ácido sulfúrico (H_2SO_4 9M), mantendo-se pH 2, tempo de acidificação de 10 minutos, agitação de 150 rpm e tempo de sedimentação de 20 minutos. Esses ensaios foram conduzidos com o emprego do equipamento de bancada *Jar Test* (PoliControl) com seis jarros com capacidade para 1 L contendo

agitadores mecânicos e a metodologia seguida foi a mesma usada por De Julio (2010).

A acidificação foi controlada durante todo o processo com uso de peagâmetro. Após a etapa de sedimentação dos sólidos, o sobrenadante contendo o coagulante recuperado foi coletado e armazenado.

Tanto o lodo *in natura* como o coagulante recuperado foram submetidos às análises de pH, Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos totais fixos (STF) e voláteis (STV), ferro, alumínio e manganês conforme as metodologias descritas na Tabela 1.

2.2 Etapa II - Ensaios de tratabilidade para clarificação da água de lavagem dos filtros (ALF)

A ALF foi submetida aos processos e operações de mistura rápida, floculação e decantação, também em equipamento Jar Test, com o uso do coagulante recuperado proveniente da etapa I. As dosa-

gens de coagulante empregadas na primeira série de ensaios foram de 5, 10, 15, 20 e 25 mg L⁻¹ em relação aos teores de alumínio recuperados.

As condições operacionais dos ensaios de tratabilidade estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados para condução dos ensaios de tratabilidade da ALF em Jar Test.

Parâmetro	Condições operacionais adotadas
pH de coagulação	5, 7 e 9
Dosagem de coagulante recuperado	5, 10, 15, 20 e 25 mg AL L ⁻¹
Gradiente de mistura rápida (G_{MR})	500 s ⁻¹
Tempo de mistura rápida (T_{MR})	30 s
Gradiente de mistura lenta (G_{ML})	40 s ⁻¹
Tempo de mistura lenta (T_{ML})	10 e 20 min
Velocidades de sedimentação (V_s)	1,4; 0,7 e 0,5 cm min ⁻¹

Após a etapa final de sedimentação, as amostras de sobrenadante foram coletadas e submetidas às análises de turbidez. Os resultados foram apresentados em diagramas de coagulação em função do pH de coagulação e da dosagem de coagulante recuperado.

A segunda série de ensaios foi realizada com a coleta de novas amostras. As dosagens de coagulante recuperado foram de 10, 15, 20, 25 e 30 mg L⁻¹ em pH fixo (pH = 7), empregando-se os dois tempos de mistura lenta nas velocidades de sedimentação de 0,7 e 0,5 cm min⁻¹.

A caracterização da água de lavagem dos filtros compreendeu as análises de pH, condutividade elétrica, DQO, sólidos totais, sólidos suspensos totais, turbidez, cor aparente, absorbância 254 nm (ABS_{254}), Fe, Al e Mn, conforme as metodologias apresentadas na Tabela 1.

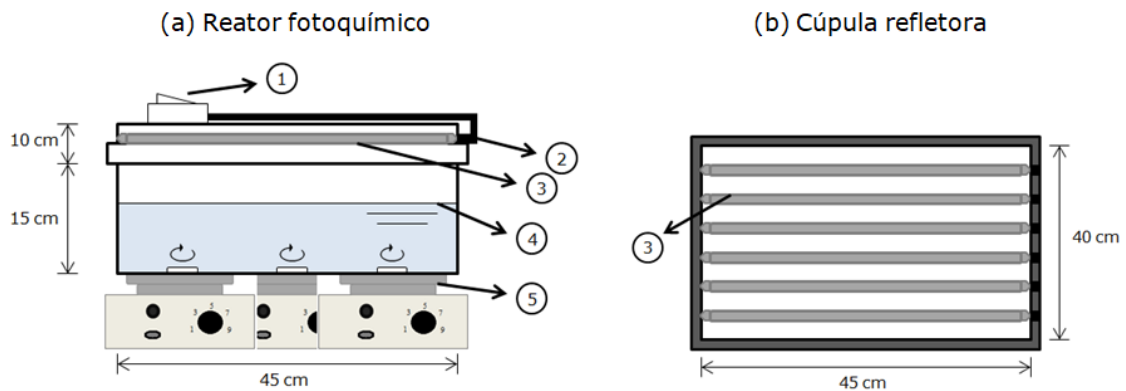
Os ensaios desta etapa tiveram como objetivo a remoção de turbidez para valores menores que

10 uT, valor este como sendo o máximo recomendado pela USEPA para operação de unidades de desinfecção com radiação ultravioleta em águas residuárias. Assim, a melhor condição obtida nos ensaios de clarificação foi adotada para realização dos ensaios de desinfecção com radiação UV.

2.3 Etapa III - Ensaios de desinfecção com radiação ultravioleta

Nessa etapa, para os ensaios de desinfecção, empregou-se um reator fotoquímico de bancada com capacidade volumétrica de 27 L, composto por uma caixa retangular confeccionada em aço inox e cúpula refletora removível (tampo) de alumínio, a qual suportava seis lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio de 15 W de potência nominal (marca Phillips).

O desenho esquemático do reator UV está apresentado na Fig. 1.



Nota: 1 – Interruptores para acionamento das lâmpadas; 2 – Conexão elétrica; 3 – Lâmpadas germinicidas UV; 4 – Lâmina líquida; 5 – Agitadores magnéticos.

Figura 1 - Reator fotoquímico de desinfecção por radiação ultravioleta: em (a) detalhamento do reator fotoquímico e em (b) a cúpula refletora.

Para obtenção da dose de radiação UV aplicada, primeiramente mediu-se a intensidade média de radiação (I_0) a partir da medição direta com uso de radiômetro (Vilber Loumart VLX-3W) equipado com sensor em comprimento de onda de 254 nm em pontos dispostos de forma equidistante a cada 5 cm da superfície do reator. Obtido o valor da intensidade média, era calculada a intensidade média efetiva (I_M) considerando a atenuação causada pelo líquido que possui a capacidade de absorver parte da radiação incidente. O I_M foi calculado por meio da Eq. 1, que segue a lei de Beer-Lambert.

$$I_M = \frac{I_0}{2,303 \cdot ABS_{254} \cdot L} (1 - e^{-2,303 \cdot ABS_{254} \cdot L}) \quad (1)$$

Em que ABS_{254} representa a absorvância a 254 nm da água, medida em cubeta de 1 cm e L corresponde a altura da lâmina líquida no reator em cm. Finalmente, a dose média expressa em $mWs \text{ cm}^{-2}$ pode ser determinada pelo produto entre a intensidade média efetiva de radiação e o tempo de exposição aplicado em segundos. Antes dos ensaios, as 6 lâmpadas foram mantidas ligadas por 15 min para estabilização das mesmas.

Para os ensaios de desinfecção, o reator foi preenchido com a água de lavagem de filtro clarifi-

cada até a altura de lâmina líquida de 4 cm. Para tal, a melhor condição de clarificação foi observada a partir dos valores de turbidez remanescentes obtidos na etapa II. Três placas agitadoras magnéticas foram posicionadas abaixo do reator UV para melhor homogeneização de toda a massa líquida. Após os tempos de exposição à luz UV de 10, 20, 30 e 60 s, alíquotas das amostras irradiadas eram coletadas para a realização dos exames microbiológicos.

Neste estudo, os microrganismos indicadores utilizados para avaliação da efetividade dos ensaios de desinfecção foram: *Escherichia coli* e coliformes totais – microrganismos comumente empregados para observar a presença, ou não, de contaminação fecal, representantes do grupo das bactérias; e *Clostridium perfringens* – bactérias esporuladas, que apresentam maior resistência às condições ambientais adversas e aos processos de desinfecção – utilizadas como indicadores de protozoários.

A pesquisa de *C. perfringens* é recomendada como um complemento importante na avaliação da qualidade das águas, seja por contaminação fecal recente ou remota, em que outros indicadores menos resistentes como *E. coli* já não estão mais presentes, bem como para outros testes,

como aqueles de amostras colhidas mais de 12 horas antes do início das análises, amostras de lodos e estudos de sobrevivência de indicadores (CETESB, 1993).

Os exames microbiológicos de coliformes totais e *E. coli* seguiram a técnica da membrana filtrante (Método 9222, APHA), empregando-se membranas de nitrato de celulose de 0,45 µm e meio de cultura *Chromocult Coliform Agar* (Merck).

Para determinação da presença de *C. perfringens* foi utilizada a técnica de tubos múltiplos, segundo a Norma CETESB L5.213 (1993) empregando-se os meios de cultura DRCM (*Differential Reinforced Clostridial Broth Base* – Himedia M549)

no exame presuntivo e o *Litmus Milk* (Sigma – Aldrich 17158) no exame confirmativo.

Os resultados dos ensaios de desinfecção foram expressos em termos de log de inativação (N_t/N_0), em que N_t representa a densidade final de microrganismos detectada após o tempo de exposição à radiação UV e N_0 a densidade inicial de microrganismos presente na amostra.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da caracterização da água de lavagem dos filtros submetida aos ensaios de tratabilidade em *Jar Test*.

Tabela 3 - Características da água de lavagem dos filtros utilizada nos ensaios de coagulação/floculação/sedimentação em *Jar Test*.

Parâmetro	Unidade	Ensaio - série 1	Ensaio - série 2
		Média ± desvio padrão	Média ± desvio padrão
pH	-	6,9 ± 0,1	7,0 ± 0,1
Temperatura	°C	18,5 ± 0,7	17,0 ± 1,6
Condutividade elétrica	µS cm ⁻¹	72,1 ± 3,5	73,1 ± 8,3
Turbidez	uT	477 ± 64,9	818 ± 495,8
Cor aparente	uC	2989 ± 904,1	5856 ± 3882,5
DQO	mg L ⁻¹	45 ± 13,6	116 ± 40,4
ST	mg L ⁻¹	579 ± 141,1	1011 ± 464,8
SST	mg L ⁻¹	478 ± 99,2	880 ± 384,7
Al	mg L ⁻¹	ND	ND
Fe total	mg L ⁻¹	18,7 ± 1,2	37 ± 8,2
Mn	mg L ⁻¹	0,4	1,54 ± 0,8
<i>Escherichia coli</i>	UFC 100mL ⁻¹	1,21 x 10 ⁴ ± 3,76 x 10 ³	1,48 x 10 ⁴ ± 2,6 x 10 ⁴
CT	UFC 100mL ⁻¹	1,08 x 10 ⁵ ± 2,13 x 10 ⁴	1,59 x 10 ⁴ ± 1,6 x 10 ⁴
<i>Clostridium perfringens</i>	NMP 100mL ⁻¹	1,6 x 10 ⁴	1,6 x 10 ⁴

Nota: ND – Não detectado.

Na Fig. 2 (2a, 2b e 2c) são apresentados os resultados da primeira série de ensaios, para diferentes condições operacionais, a partir da qual

foram gerados os diagramas de coagulação com curvas de isoefficiência de turbidez, para os valores remanescentes de até 10 uT.

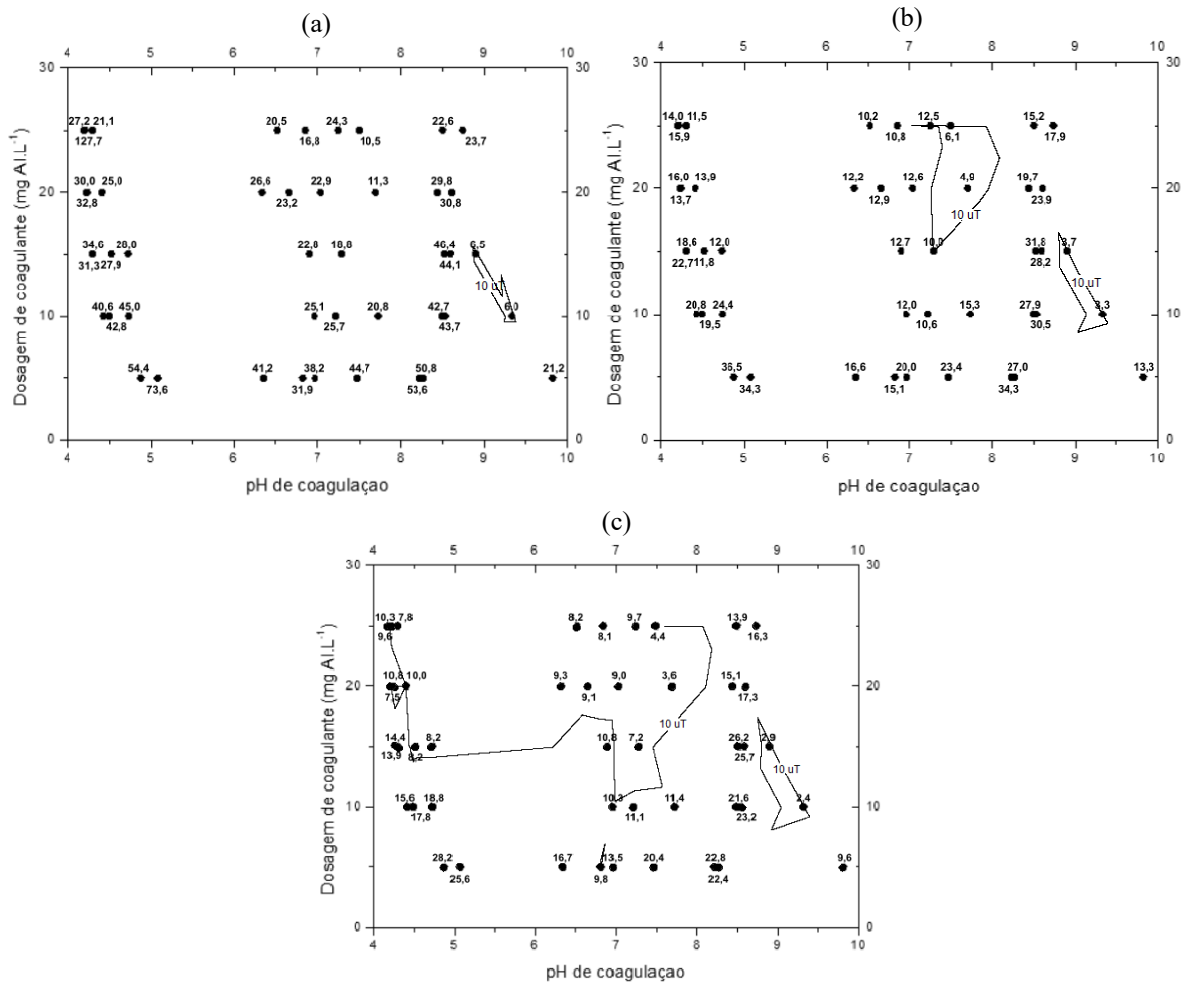


Figura 2 - Diagramas de coagulação para turbidez remanescente média nos ensaios com TML = 10 min: (a) VS 1,4 cm min⁻¹, (b) VS = 0,7 cm min⁻¹ e (c) VS = 0,5 cm min⁻¹.

Para a primeira condição empregada (Fig. 2a) entre as dosagens de coagulante de 10 e 15 mg L⁻¹ e pH entre 9,0 e 9,5, foram obtidos valores de turbidez remanescente inferiores a 10 uT. Com a diminuição da velocidade de sedimentação de 1,4 cm min⁻¹ para 0,7 cm min⁻¹ (Fig. 2b), ocorreu a expansão da área ótima requerida na faixa de pH

próximo ao neutro. Na menor velocidade de sedimentação estudada, de 0,5 cm min⁻¹ (Fig. 2c), foi possível verificar a ampliação da região ótima de remoção de turbidez abrangendo quase todo o espectro de valores de pH estudados.

Na Fig. 3 são apresentados os resultados dos ensaios com TML de 20 minutos.

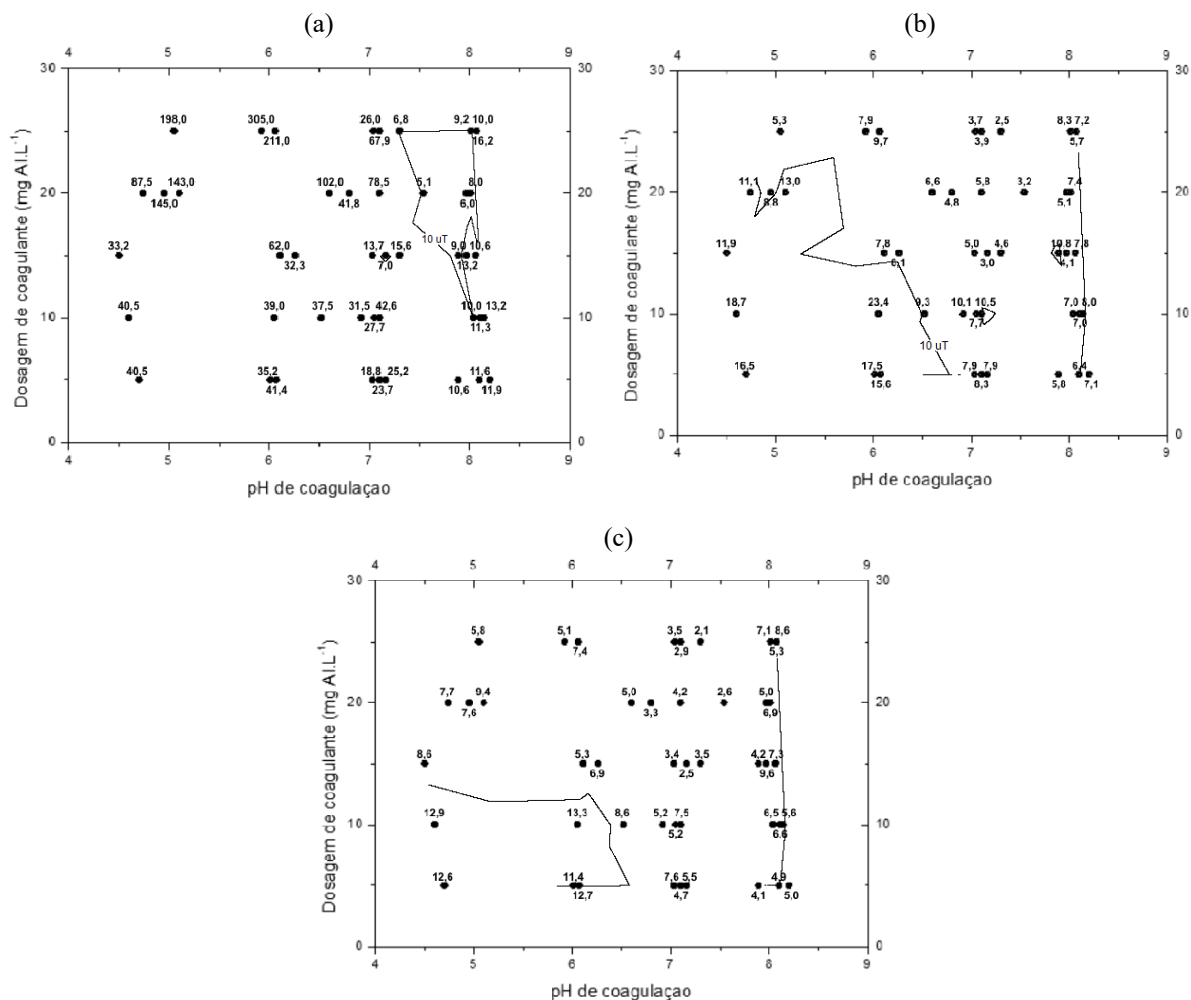


Figura 3 - Diagramas de coagulação para turbidez remanescente média nos ensaios com TML = 20 min: (a) VS 1,4 cm min⁻¹, (b) VS = 0,7 cm min⁻¹ e (c) VS = 0,5 cm min⁻¹.

Pode-se verificar que para a maior velocidade de sedimentação adotada, correspondente a 1,4 cm min⁻¹ (Fig. 3a), os valores de turbidez menores que 10 uT foram obtidos em valores de pH elevados e nas maiores dosagens de coagulante.

Com a diminuição da velocidade de sedimentação, de 1,4 cm min⁻¹ para 0,7 cm min⁻¹, ocorreu novamente a expansão da área ótima para faixa de valores de pH neutros e ácidos, indicando que a coagulação em pH inferiores a 7 produziu flocos de baixa sedimentabilidade requerendo, ao sistema, maior tempo de sedimentação, e, consequentemente a ocorrência da clarificação.

Comparativamente, os tempos de floculação estudados influenciaram na formação e na sedimentabilidade dos flocos obtidos, indicando a ocorrência de mecanismos múltiplos de coagulação, proporcionando, em condições de maior retenção, menores remanescentes de turbidez.

Após a primeira série de ensaios, foram ajustadas as dosagens de coagulante aplicadas com o intuito de avaliar a sedimentação em velocidades mais elevadas, considerando que as eficiências de remoção requeridas tinham sido observadas nas maiores dosagens de coagulante e em baixas velocidades de sedimentação.

A segunda série de ensaios foi realizada adotando-se pH 7, considerando-se o comportamento verificado a partir dos ensaios anteriores. Para tanto, novas amostras de ALF foram coletadas, cuja caracterização encontra-se na Tabela 3.

No decorrer dos ensaios verificou-se que não houve remoções satisfatórias nas VS elevadas e optou-se pela avaliação da correção da dosagem para as menores velocidades de sedimentação ($0,7 \text{ cm min}^{-1}$ e $0,5 \text{ cm min}^{-1}$), os remanescentes de turbidez foram apresentados na Fig. 4.

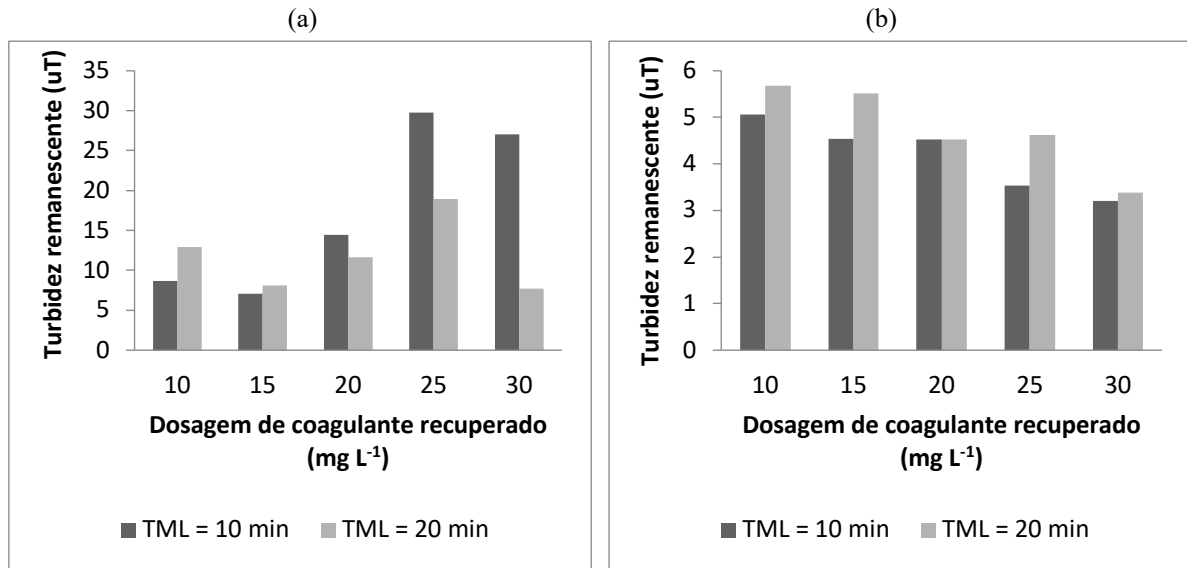


Figura 4 - Turbidez remanescente média para TML = 10 e 20 min em diferentes dosagens de coagulante empregadas em distintas velocidades de sedimentação estudadas: em (a) VS= $0,7 \text{ cm min}^{-1}$ e em (b) VS= $0,5 \text{ cm min}^{-1}$.

Conforme indica a Fig. 4a, a clarificação da ALF alcançou turbidez remanescente menor que 10 uT para as dosagens de coagulante de 10 e 15 mg L⁻¹, no tempo de mistura lenta de 10 minutos e nas dosagens de 15 e 30 mg L⁻¹ para o tempo de mistura lenta de 20 minutos.

Com a redução da velocidade de sedimentação (Fig. 4b), foi possível obter valores de turbidez remanescente inferiores a 6 uT em todos os ensaios. Para as dosagens de coagulante de 30 mg L⁻¹ no T_{ML} de 10 min registrou-se o menor valor observado de turbidez remanescente ($3,2 \pm 1,2 \text{ uT}$). Assim, essa condição foi adotada para a condução dos ensaios subsequentes de desinfecção por radiação UV (etapa III), por oferecer maior remoção de turbidez e, conseqüentemente, uma água de melhor qualidade para a desinfecção.

3.1 Ensaios de desinfecção da água de lavagem de filtro clarificada com radiação UV

A intensidade média obtida a partir da medição da intensidade de radiação UV emitida pelas lâmpadas foi de $5,77 \pm 1,23 \text{ mW cm}^{-2}$. O comportamento da distribuição da radiação no interior do reator fotoquímico foi observado conforme representado na Fig. 5. Indicando que não há uma distribuição homogênea da radiação dentro do reator refletindo na formação de zonas sujeitas ao recebimento de níveis de intensidade diferentes de radiação, justificando-se assim, a agitação durante a condução dos ensaios tanto para suspensão da massa líquida como para a melhor distribuição da ALF clarificada no reator.

A dose média calculada a partir dos tempos de exposição determinados variou de 47,3 ± 0,7 mW cm⁻² para o menor tempo (10 s),

94,6 ± 1,4 mW cm⁻², 141,9 ± 2,1 mW cm⁻² a 282,8 ± 4,2 mW cm⁻² para o maior tempo (60 s).

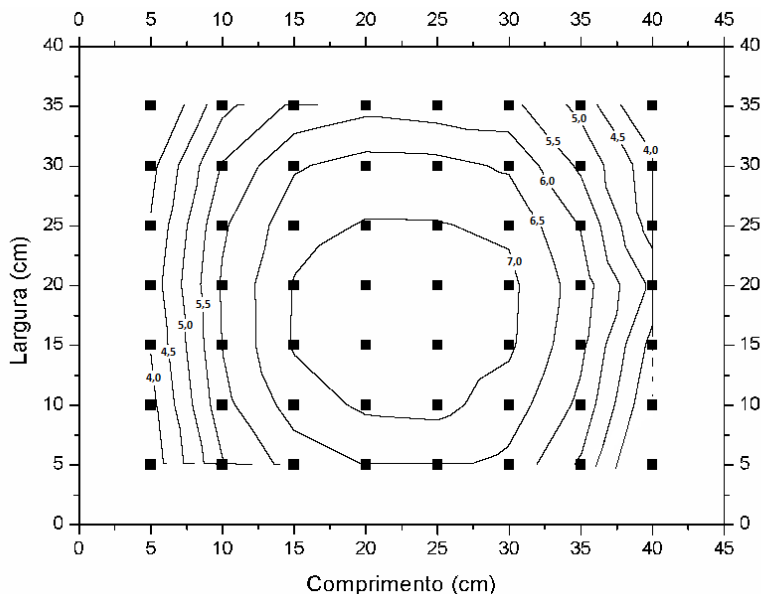


Figura 5 - Distribuição da radiação no interior do reator UV em mW cm⁻², indicando curvas de mesma intensidade de radiação.

A ALF clarificada nos ensaios em Jar Test apresentou as características relacionadas na Tabela 4. De modo geral, todos os valores dos parâmetros observados foram reduzidos significativamente; entretanto, os valores de condutividade elétrica aumentaram em vista à adição de coagulantes na etapa de coagulação. Essa alteração não afeta

negativamente os ensaios de desinfecção com radiação UV.

A turbidez, utilizada como parâmetro de grande interesse e controle do processo de desinfecção, após a clarificação foi reduzida em 98% atingindo turbidez remanescente entre 1,4 e 3,6 uT.

Tabela 4 - Características da água de lavagem dos filtros utilizada nos ensaios de desinfecção com radiação ultravioleta.

Parâmetro	Unidade	ALF _{bruta}	ALF _{clarificada para desinfecção}
		Média ± desvio padrão	Média ± desvio padrão
pH	-	7,1 ± 0,2	7,0 ± 0,1
ABS ₂₅₄	cm ⁻¹	0,04 ± 0,01	0,04 ± 0,004
Condutividade elétrica	µS cm ⁻¹	71,5 ± 11,3	386,5 ± 11,7
Turbidez	uT	232,1 ± 74,9	2,9 ± 0,7
Cor aparente	uC	1976,2 ± 74,9	19,5 ± 7,5
DQO	mg L ⁻¹	76,8 ± 21,5	18,1 ± 7,5
ST	mg L ⁻¹	656,9 ± 431,6	330,0 ± 44,9
SST	mg L ⁻¹	380,7 ± 76,7	8,5 ± 4,6
Al	mg L ⁻¹	0,12 ± 0,27	0,046 ± 0,03
Fe total	mg L ⁻¹	12,1 ± 4,0	0,09 ± 0,1
Mn	mg L ⁻¹	0,50 ± 0,12	0,485 ± 0,03
<i>Escherichia coli</i>	UFC 100mL ⁻¹	1,48 × 10 ⁴	1,79 × 10 ²
CT	UFC 100mL ⁻¹	1,50 × 10 ⁴	2,42 × 10 ²
<i>Clostridium perfringens</i>	NMP 100mL ⁻¹	1,6 × 10 ⁴	1,35 × 10 ³

A clarificação da água de lavagem dos filtros permitiu a redução da concentração dos microrganismos indicadores em aproximadamente 2,1 log para *E. coli*, 1,8 log para CT e 1,7 log para *C. perfringens*, alcançando respectivamente 98,6%, 98,5% e 91,5% de remoção.

De modo geral, foi possível observar o decaimento no número de microrganismos indicadores com o aumento do tempo de exposição a radiação UV, conforme a Fig. 6. Para a quantificação da inativação nos casos abaixo do limite de detecção do método, optou-se pela adoção da ocorrência de uma unidade formadora de colônia (UFC) para efeito dos cálculos.

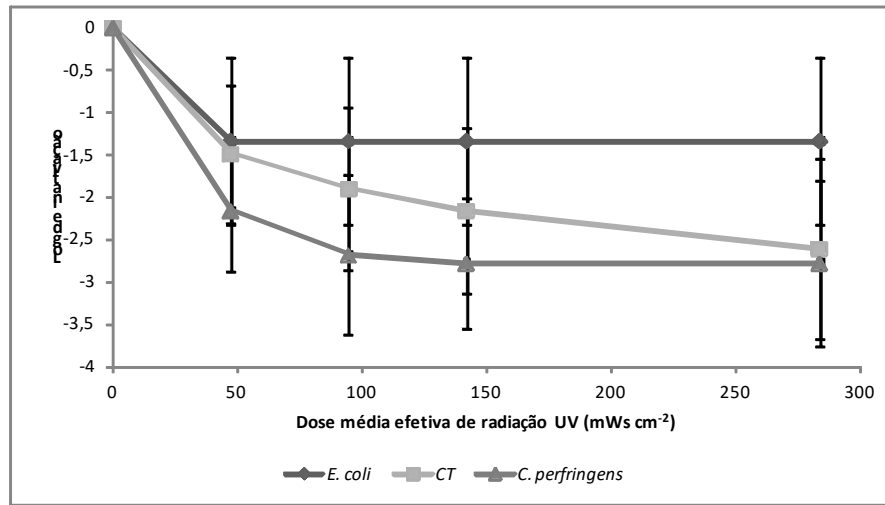


Figura 6 - Inativação de *E. coli*, CT e *C. perfringens* em função da dose média de radiação UV aplicada para a água de lavagem dos filtros clarificada por coagulação/floculação/sedimentação com uso do coagulante recuperado.

No tempo de 10 s de exposição, correspondendo a uma dose média efetiva aproximada de $47,3 \pm 0,7$ mW cm⁻², foi possível atingir média de remoção de $1,3 \pm 0,9$ log para *E. coli*, indicando concentração final inferior a 1,0 UFC 100 mL⁻¹ em todos os ensaios. Em relação ao grupo CT, observou-se o decréscimo contínuo na densidade de microrganismos no decorrer do tempo de exposição, em função do aumento das doses, com remoção média de $2,0 \pm 0,9$ log. No entanto, a remoção total desse grupo não foi alcançada para nenhuma das doses empregadas, obtendo-se valor remanescente de 3,4 UFC 100mL⁻¹.

Em relação ao indicador *C. perfringens*, houve o decaimento da concentração desses microrganismos ao longo dos tempos de exposição, demonstrando maior resistência desses à desinfecção, alcançando-se $2,6 \pm 0,8$ log de inativação, não

tendo sido atingida a inativação total desses nas doses empregadas obtendo-se um remanescente médio de 7,3 NMP 100mL⁻¹. Sendo este grupo microbiano o mais preocupante por indicar a potencial presença de poluição remota e microrganismos mais resistentes como protozoários.

Importante salientar que nesta pesquisa investigou-se a coagulação química seguida de floculação mecanizada e sedimentação, sob várias condições de mistura e velocidade de sedimentação, em escala de bancada, sem incluir a comparação desse estudo com outras opções tecnológicas, também consideradas viáveis para a área, como a utilização de polímeros.

A recuperação de coagulante do lodo pode abater o custo do transporte e destinação final do lodo, principalmente numa situação de total recupe-

ração e reutilização desse recurso, bem como a extrapolação para a escala plena implica na construção e operação de novas unidades. Nesse sentido, a aplicabilidade prática dessa pesquisa necessita de estudo da viabilidade econômica do processo para as condições específicas de cada ETA, que não foi avaliado na presente pesquisa.

Destaca-se ainda a importância do monitoramento continuado dos contaminantes gerados pela ressolubilização do lodo, dado o risco potencial de acumulação gradual desses no sistema.

4 CONCLUSÕES

A recuperação do coagulante mostrou-se uma estratégia atrativa para a gestão dos resíduos da etapa de coagulação da estação de tratamento de água. Sua aplicação na decantação da água de lavagem do filtro em uma dosagem de 30 mg L⁻¹ de Al em pH de coagulação de 7,0, em baixas velocidades de sedimentação, permitiu reduzir de forma satisfatória os principais parâmetros estudados, alcançando-se remoções de turbidez e SST, respectivamente de 98,9% e 97,7%, com residuais variando entre 2,9 ± 0,7 uT e 8,5 ± 4,6 mg L⁻¹. Essa condição permitiu a redução da densidade inicial dos microrganismos indicadores empregados na pesquisa, diminuindo a concentração desses no afluente aos ensaios de desinfecção.

A desinfecção com uso da radiação ultravioleta permitiu a redução da concentração dos três microrganismos indicadores avaliados. Com base nos resultados, pode-se observar que a bactéria *Escherichia coli* foi o microrganismo menos resistente, seguida de *Clostridium perfringens* e coliformes totais.

A opção de tratamento proposta para a água de lavagem de filtros de ETA: coagulação/floculação/sedimentação utilizando-se de coagulante recuperado seguida de desinfecção com radia-

ção UV mostrou-se eficiente para a remoção dos principais parâmetros físico-químicos e no controle microbiológico da ALF, sendo capaz de gerar água tratada para fins de reúso, exigindo-se, entretanto, a condução de estudos adicionais relacionados à utilização do coagulante recuperado e à geração de possíveis subprodutos.

Embora os resultados apresentados neste artigo demonstrem a aplicabilidade do processo proposto, estudos de viabilidade técnico-econômica devem ser realizados considerando fatores como instalação, operação e geração de excedentes.

5 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de Financiamento 001).

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Vidal CMS, Souza JB e Filipaki A; **Metodologia:** Vidal CMS, Souza JB e Filipaki A; **Investigação:** Vidal CMS, Souza JB e Filipaki A; **Redação – Primeira versão:** Filipaki A; **Redação – Revisão & Edição:** Vidal CMS, Souza JB e Filipaki A; **Aquisição de financiamento:** Vidal CMS e Souza JB.

7 REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington: WEF, 2017, 2670 p.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Norma Técnica L 5.213**. Determinação do número mais provável

- de clostrídios sulfitorredutores (*Clostridium perfringens*): método de ensaio. São Paulo, 1993.
- CHEN, Y. L. et al. Combining physico-chemical analysis with a *Daphnia magna* bioassay to evaluate a recycling technology for drinking water treatment plant waste residuals. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 122, p. 368-376, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.08.023>
- DE JULIO, M. et al. Reúso do coagulante recuperado do lodo de ETA no tratamento terciário de efluente de lagoa de polimento precedida de reator RALF. **Revista DAE**, 185, p. 4 - 9 2011.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: LDiBe, 2012. 540 p.
- FREITAS, J. G.; FERREIRA FILHO, S. S.; PIVELI, R. P. Viabilidade técnica e econômica de regeneração de coagulantes a partir de lodos de estações de tratamento de água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 137-145, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000200007>
- FRIES, J.; GETROST, H. **Organic reagents for trace analysis**. MERCK, pg. 236, 1977.
- GONÇALVES, R. F. et al. Recuperação de coagulantes de lodos de estações de tratamento de águas. In: REALI, M. A. P. (Coord.). **Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas de saneamento 2011**. Rio de Janeiro, 2011. 268 p.
- _____. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010. 219 p.
- ISAAC, R. L. Remoção de *Cryptosporidium* e *Giardia*. In: I Seminário Internacional em Protozoários Patogênicos Emergentes; II Congresso da Sociedade Paulista de Parasitologia: Meio Ambiente, Saneamento e Impactos na Saúde, 3 a 5 de novembro de 2004. Campinas, SP, 2004. **Anais...**
- JUNG, K. et al. Comprehensive reuse of drinking water treatment residuals in coagulation and adsorption process. **Journal of Environmental Management**, 181, p. 425-434, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.041>
- KEELY, J.; JARVIS, P.; JUDD, S. J. An economic assessment of coagulant recovery from water treatment residuals. **Desalination**, 287, p. 132-137, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.013>
- KEELEY, J. et al. Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment, **Water Research**, 88, p. 502-509, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.038>
- MERCK, E. **Analisis del agua**. Darmstadt, Alemanha. p.114
- SEMA – Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Resolução nº 21 de 22 de abril de 2009**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. Curitiba, PR.
- _____. PERS – **Plano Estadual de Resíduos Sólidos, Relatório Síntese**. Governo do Estado do Paraná. Curitiba, PR, 2018. Disponível em: <http://www.residuossolidos.sema.pr.gov.br/modules/documentos/view_file.php?current_file=1309¤t_dir=1238&summary=1>. Acesso em: 07/11/2018.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Drinking water treatment plant residuals**. 2011. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-11/documents/dw-treatment-residuals-mgmt-tech-report-sept-2011.pdf>>. Acesso em 29 out. 2016.
- XU, G. R. et al. Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment. **Journal of Hazardous Materials**, 161, p. 663-669, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.008>