

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

APRIMORAMENTO DA QUALIDADE DE EFLUENTE DE REATORES ANAERÓBIOS POR COAGULAÇÃO COM TANINO VEGETAL

IMPROVEMENT OF ANAEROBIC REACTORS EFFLUENT QUALITY BY COAGULATION USING TANNIN COAGULANT

Recibido el 8 de octubre de 2017; Aceptado el 21 de marzo de 2018

Abstract

Upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors present low efficiency regarding to the removal of nutrients, organic matter and pathogenic microorganisms. Therefore, it is necessary to use a post-treatment to improve the quality of the final effluent. In this respect, it was collected UASB reactor effluent samples for performing coagulation/flocculation/sedimentation tests on a bench scale (jar-test) using a natural tannin-based coagulant. It also investigated the potential of a subsequent rapid filtration through sand filters. The operating conditions used in the tests were: coagulation velocity gradient of 600s^{-1} and rapid mixing time equal to 10 seconds; flocculation velocity gradient of 40s^{-1} and slow mixing time equal to 15 minutes; it was tested three settling velocities, which was 0.6 ; 0.3 e $0.2\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, and coagulant dosages ranging from 10.0 to $50.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The analysis of variance and Tukey's multiple comparison test resulted in the optimum coagulant dosage of $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and the settling velocity of $0.6\text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, which showed good results in terms of turbidity, apparent color, true color and COD of the effluent from UASB. It was not observed removal of total phosphorus in the studied effluent. Concerning to the removal of pathogenic microorganisms, it was achieved a 95.4 % removal efficiency for total coliforms (TC) and *E. Coli*. The Student's t-test showed that the use of sand filters was potentially viable for the removal of turbidity, apparent color and *E. Coli*.

Keywords: coagulation, natural coagulant, sand filtration, UASB, wastewater.

¹ Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil.

² Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

³ Departamento de Ciências Florestais, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil.

⁴ Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil.

*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, PR 153, Km 7, s/n – Riozinho, Irati, Paraná. 84500000. Brasil. Email: mirellymanica@hotmail.com

Resumo

Os reatores UASB apresentam baixa eficiência de remoção de nutrientes, matéria orgânica e microrganismos patogênicos, fazendo-se necessário o uso de um pós-tratamento visando o aprimoramento da qualidade do efluente gerado. Para este propósito, coletaram-se amostras de efluente de reator UASB para a realização de ensaios de coagulação/floculação/sedimentação em escala de bancada (jar-test) utilizando-se um coagulante natural a base de tanino. Investigou-se também a potencialidade de uma posterior filtração rápida em filtros de areia. As condições operacionais empregadas nos ensaios foram: gradiente e tempo de mistura rápida de 600 s^{-1} e 10 s, e gradiente e o tempo de mistura lenta de 40 s^{-1} e 15 min, velocidades de sedimentação de 0.6; 0.3 e 0.2 cm.min^{-1} e dosagens de coagulante variando de 10.0 a 50.0 mg.L^{-1} . A análise de variância (ANOVA) e o teste Tukey empregados, resultaram na dosagem ótima de coagulante de 15 mg.L^{-1} e velocidade de sedimentação de 0.6 cm.min^{-1} . Nessas condições, o processo de coagulação com tanino mostrou bons resultados em termos de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO do efluente do UASB. Não foi observado remoção de fósforo total do efluente em estudo. Quanto a remoção de microrganismos patogênicos, atingiu-se uma eficiência de 95.4 % para CT e *E. Coli*. O Teste T de Student apontou potencialidade no uso de filtro de areia para a remoção de turbidez, cor aparente e *E. Coli*.

Palavras chave: coagulação, coagulante natural, esgoto sanitário, filtração em areia, UASB.

Introdução

Os processos anaeróbios têm sido frequentemente implantados em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) em todo o país. Dentre esses sistemas destacam-se os reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB). Chernicharo (1997) destaca que, quando implantados em países de clima quente, os reatores UASB são caracterizados como sistemas compactos, de baixo custo de construção e operação, baixa produção de lodo, baixo consumo de energia, satisfatória remoção de DQO e DBO de 65 a 75%, produzindo lodo concentrado e de fácil desidratação.

De acordo com Sousa *et al.* (2004) em regiões de clima tropical, como o Brasil, a utilização de reatores anaeróbios pode ser uma solução para o tratamento de esgotos, fato este explicado por Cardoso *et al.* (2003) como sendo resultado do melhor desempenho das bactérias anaeróbias em ambientes com temperaturas superiores a 20°C .

Os processos anaeróbios têm se destacado devido as suas vantagens em relação aos sistemas aeróbios (Chernicharo, 1997). Algumas das vantagens dos reatores UASB são o baixo tempo de detenção apresentado, a geração de lodo mais estabilizado e em menor quantidade quando comparado aos reatores biológicos aeróbios convencionais. Porém, apesar das diversas vantagens, os efluentes provenientes dos reatores anaeróbios em muitas ocasiões não atendem aos padrões estabelecidos nas legislações ambientais do país. Isso decorre do fato destes sistemas não serem eficientes na remoção de nutrientes (fósforo e nitrogênio), na redução de patogênicos e na completa remoção de matéria orgânica (Silva *et al.*, 2007).

Neste contexto, faz-se necessário o pós-tratamento de efluente de reatores anaeróbios visando o aprimoramento da qualidade do efluente final. Reali *et al.* (1998) afirmam que os efluentes provenientes de reatores anaeróbios necessitam ainda de tratamento complementar devido a baixa remoção da carga orgânica do esgoto sanitário. De acordo com Metcalf e Eddy (2003) o tratamento avançado de efluentes é aquele necessário para a remoção de constituintes remanescentes do tratamento secundário convencional, os quais podem estar presentes na forma de sólidos em suspensão, coloidais e/ou dissolvidos.

Os processos físico-químicos, conforme Santos (2001), estão cada vez mais presentes no tratamento de águas residuárias, e isso decorre da elevada potencialidade do uso desses processos associados a processos biológicos anaeróbios. Nessa perspectiva, uma excelente alternativa de pós-tratamento pode ser a coagulação/floculação/decantação/filtração.

Processos de coagulação/floculação/decantação sempre chamaram a atenção por serem simples, de custo relativamente baixo e eficientes dentre as tecnologias de tratamento (Beltrán-Heredia *et al.*, 2010), além de permitir elevada eficiência de remoção de poluentes no tratamento de efluentes (Aboulhassan *et al.*, 2016). A coagulação/floculação e posterior decantação têm por finalidade dentre outros fatores, remover as matérias coloidais e particuladas, propiciando assim melhoria na remoção de fósforo, turbidez e cor do efluente (Vaz, 2010).

Comumente o processo de coagulação de água e esgoto é realizado com sais inorgânicos, como o sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato férrico e cloreto de polialumínio, porém, o uso desses coagulantes sintéticos pode ser prejudicial os seres humanos e aos organismos vivos. Na perspectiva de Silva (2007) apesar dos coagulantes sintéticos serem os mais utilizados no tratamento de água e esgoto, estudos apontam algumas desvantagens do uso desses coagulantes, como a geração de grande volume de lodo, e problemas de saúde causados pelos sais residuais em águas tratadas. Desta forma, novas pesquisas estão sendo direcionadas na busca por coagulantes naturais que minimizem esses efeitos.

Neste contexto, a substituição dos sais inorgânicos por coagulantes naturais, como o tanino, vem se tornando excelente alternativa, pois estes são produtos de origem renovável, evitando os efeitos negativos advindos de sais metálicos remanescentes, geram menor quantidade de lodo, sendo estes biodegradáveis facilitando a sua disposição, além de não consumir a alcalinidade da água e não persistir no efluente tratado e no lodo gerado (Piantá, 2008; Konradt-Moraes e Bergamasco, 2007).

Dentre as características do tanino, Konradt-Moraes e Bergamasco (2007) e Silva (1999) descrevem que estes coagulantes não alteram o pH da água tratada, pois não consome alcalinidade do meio, além de apresentar elevada eficiência na faixa de pH de 4.5 a 8.0, o que dispensa o uso de alcalinizantes.

Coagulantes a base de tanino apresentam vantagens técnicas e ambientais quando comparados aos coagulantes a base de sais. Tecnicamente o processo de coagulação com tanino é mais simples do que quando utilizados sais metálicos, não é necessário ajuste de pH da água ou efluente a ser tratado, além de não ser necessário o uso de agentes de floculação. Os coagulantes a base de tanino possuem ainda a habilidade de produzir flocos grandes, densos e compactos que são fortes e tem ótima característica de sedimentação (Aboulhassan *et al.*, 2016).

O coagulante tanino é extraído da casca de vegetais como a Acácia Negra, e atua em sistemas coloidais, neutralizando as cargas dos colóides e formando pontes entre partículas, resultando na formação de flocos de boa sedimentabilidade. São produtos polifenólicos de origem vegetal, podendo estar presente em todos os elementos das plantas mais altas, e são consideradas alternativas viáveis de substituição dos polieletrólitos ou dos coagulantes sintéticos (Ozacar e Sengil, 2003 e Coral *et al.*, 2009).

Diante desse cenário, o presente trabalho visa avaliar a eficiência dos processos de coagulação/floculação/sedimentação e filtração utilizando coagulante natural à base de tanino vegetal, para o tratamento avançado de efluente de reator UASB, no que diz respeito à remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, fósforo total, DQO, coliformes totais e *Escherichia Coli* de efluente de UASB.

Material e métodos

Para a pesquisa foram coletadas amostras de efluente do reator UASB de uma ETE do município de Irati – PR. As amostras coletadas foram utilizadas para compor duas campanhas de experimentos (Campanha A e Campanha B). Previamente à realização dos ensaios de coagulação, conduziu-se a caracterização do efluente bruto do reator UASB.

O processo de coagulação (Campanha A e B) foi realizado utilizando-se o coagulante natural à base de tanino Acquapol S5T, que é um líquido castanho escuro com densidade de 1.07 a 1.17 g.cm⁻³, pH em média de 2.29 e caráter catiônico. Os ensaios foram conduzidos em escala de bancada, pelo equipamento Jar-test, PoliControl – Modelo FlocControl III, seis jarros de acrílico com capacidade de dois litros cada e regulador de rotação das hastes misturadoras.

Em ambas as Campanhas (A e B) para a fase de coagulação, o gradiente e o tempo de mistura rápida empregados, foram de 600 s⁻¹ e 10 s, respectivamente. Na fase de floculação o gradiente e o tempo de mistura lenta empregados, foram 40 s⁻¹ e 15 min, respectivamente. Previamente aos primeiros ensaios em jar-test, fez-se a caracterização dos seguintes parâmetros do efluente bruto: turbidez (uT), cor aparente (uC), cor verdadeira (uC), pH e temperatura (°C).

Os primeiros ensaios foram referentes a Campanha A, que teve por objetivo obter a dosagem ótima do coagulante e a escolha da melhor velocidade de sedimentação. Para tanto foram testadas três diferentes velocidades de sedimentação ($0.6 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$, $0.3 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ e $0.2 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$), e as seguintes dosagens de coagulante (Tanino S5T): 10.0; 15.0; 20.0; 25.0; 30.0; 35.0; 40.0; 45.0; e $50.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, em pH natural. Utilizou-se como parâmetro de controle (eficiência) a turbidez do efluente tratado.

Dadas às condições ótimas operacionais (dosagem de coagulante e velocidade de sedimentação) seguiu-se para a Campanha B. Nessa segunda etapa, novamente realizou-se a caracterização do efluente bruto para os seguintes parâmetros: turbidez (uT), cor aparente (uC), cor verdadeira (uC), pH, temperatura ($^{\circ}\text{C}$), DQO ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), fósforo total ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), coliformes totais (UFC/100mL) e *E. Coli* (UFC/100mL). Feito isto, conduziram-se os ensaios em escala de bancada (Jar-test) empregando-se somente a dosagem ótima do coagulante na melhor velocidade de sedimentação. Após as etapas de coagulação/floculação/sedimentação, o efluente foi submetido ao ensaio de filtração rápida em leito de areia (diâmetro de 1.00 a 1.41 milímetros para o menor e maior grão, respectivamente), com tempo médio de filtração de 20 minutos e taxa de filtração variando de 62 a $103 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$. Para esse ensaio acoplaram-se 6 filtros ao jar-test em posição que as saídas dos jarros descarregassem o efluente exatamente no interior de cada filtro, e seguiu-se a metodologia proposta por Di Bernardo e Centurione Filho (2003).

Na Campanha B objetivou-se avaliar a eficiência da coagulação química, com tanino vegetal para a remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, fósforo total, coliformes totais (CT) e *E-coli*, e verificar se a adição da etapa de filtração no processo proporciona melhoria significativa na qualidade do efluente tratado no que tange aos parâmetros: turbidez, cor aparente, cor verdadeira, DQO, fósforo total, coliformes totais e *E. Coli*. Para a determinação dos parâmetros microbiológicos (CT e *E. Coli*) utilizou-se a técnica de filtração em membranas (Method 9222, APHA, 1999).

As análises físico-químicas empregadas foram: pH (4500-H^+), temperatura (2550), turbidez (2130), cor aparente e cor verdadeira (2120), fósforo total (4500-P) e DQO (5220 A), que foram realizadas de acordo com a 20ª edição do Standard Methods for Examination of the Water and Wastewater (Apha, 1999).

Delineamento experimental e análise estatística dos dados

Os dados foram previamente checados quanto à gaussianidade de resíduo e homogeneidade de variâncias pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e Bartlet, respectivamente (Zar, 1999).

A Campanha A foi conduzida no delineamento inteiramente casualizado, em arranjo fatorial (10×3), sendo os fatores constituídos por dez dosagens de coagulante e três velocidades de

sedimentação, utilizando-se três repetições por tratamento. A testemunha constituiu de um jarro de amostra de efluente em que não foi adicionado coagulante (dosagem 0 mg.L⁻¹).

As médias obtidas foram analisadas no *software* Statistica 10 (versão Trial), procedendo-se a ANOVA (Análise de Variância) e, quando pertinente, o teste de Tukey. Os dados provenientes da Campanha B foram contrastados mediante o teste t Student para amostras dependentes. O nível de significância para todos os testes foi de 5 %.

Resultados e discussões

Campanha A - Otimização das dosagens de coagulante tanino e da velocidade de sedimentação

Na tabela 1 encontra-se a caracterização das amostras de efluente do UASB utilizadas na Campanha A.

Tabela 1. Caracterização prévia do efluente do UASB utilizado na Campanha A (n=1).

Parâmetro	Valor	Unidade
pH	7.2	
Turbidez	35	uT
Cor aparente	265	uC
Cor verdadeira	96	uC
Temperatura	20.6	°C

n = número de repetições.

Na tabela 2 encontram-se os resultados da análise de variância (ANOVA) do parâmetro turbidez utilizando-se diferentes dosagens e diferentes velocidades de sedimentação. Os fatores testados foram a dosagem de tanino, a velocidade de sedimentação e a interação entre os dois fatores.

Tabela 2. Análise de variância do parâmetro turbidez, com diferentes dosagens do coagulante tanino e com diferentes velocidades de sedimentação.

Fonte de variação (FV)	Grau de liberdade (GL)	Soma dos quadrados (SQ)	Quadrados médios (QM)	F
Dosagem de tanino	9	3739.89463	415.54385	526.9164 *
Velocidade de sedimentação	2	4.16444	2.08222	2.6403 ns
Int. Dosagem x Velocidade	18	15.38483	0.85471	1.0838 ns

*Significativo pelo teste F ($p \leq 0.05$). ns = não significativo pelo teste F ($p \geq 0.05$).

A partir dos resultados obtidos pela análise de variância pode-se verificar que apenas a variação da dosagem de coagulante apresentou diferença estatística significativa entre as médias de turbidez remanescente. Podendo-se, desta forma, afirmar que o fator velocidade de sedimentação não apresentou influência significativa na remoção de turbidez do efluente, já que o valor de F não se mostrou significativo para essa fonte de variação. Da mesma maneira, a variação considerando a interação da dosagem de coagulante com a velocidade de sedimentação também não apresentou diferença significativa (F não significativo).

Com base nesta constatação, foi possível atribuir a maior velocidade de sedimentação ($0.6 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$) como sendo a velocidade ótima para o tratamento. Para a escolha da dosagem ótima de coagulante, seguiu-se com o teste de comparação de médias Tukey para o fator dosagem, o qual apresentou diferença estatística significativa na análise de variância.

Na figura 1 encontram-se os resultados do teste de médias Tukey do parâmetro turbidez para o fator dosagem de coagulante tanino.

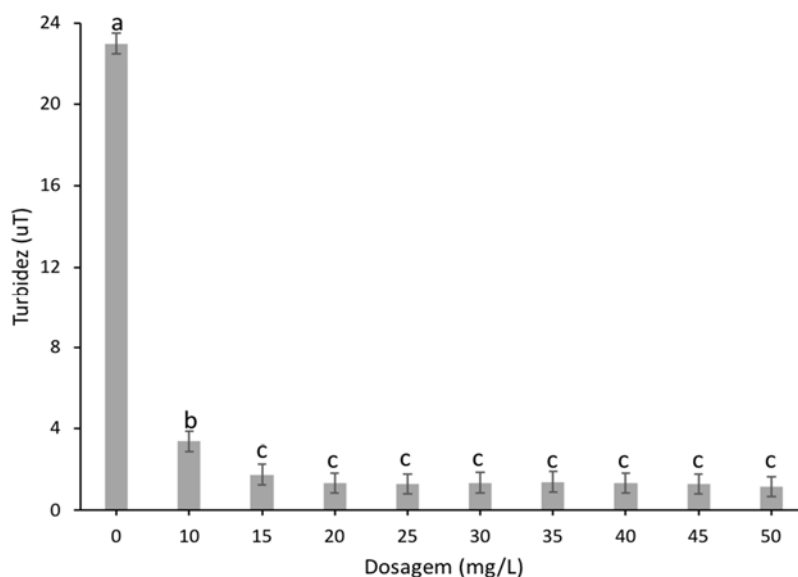


Figura 1. Teste Tukey para o fator dosagem de coagulante tanino utilizada no tratamento (médias de turbidez remanescente seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si).

Verifica-se a partir da figura 1, que a média de turbidez sem uso de coagulante ($0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ - controle) apresenta diferença significativa em relação às médias das outras dosagens, o que pode ser constatado a partir das letras diferentes, e das barras de erro que não estão se tocando. O mesmo ocorre com a média de turbidez utilizando-se a dosagem de $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, que apresenta diferença significativa em relação à todas as outras médias, e menor eficiência de remoção (90.34 %).

Entretanto, nota-se pela figura 1 que a partir da dosagem de 15 mg.L^{-1} as médias de turbidez não apresentaram diferenças significativas entre si, demonstrando ainda maiores eficiências de remoção (acima de 94.7 %). Dessa forma, adotou-se a dosagem de 15 mg.L^{-1} como sendo a dosagem ótima para a coagulação com coagulante tanino para amostra de efluente de UASB estudada.

Pelegrino (2011), que estudou a aplicação de coagulante à base de tanino em efluente de reator anaeróbio por flotação, constatou eficiências de remoção de turbidez acima de 80 % apenas com dosagens de tanino acima de 100 mg.L^{-1} de coagulante (turbidez inicial de 94 uT). Testando-se dosagens mais baixas, de 5 a 25 mg.L^{-1} o autor alcançou eficiência máxima de remoção de turbidez de 24.72 %, para um efluente com turbidez inicial de 85.77 uT. Comparando-se com as dosagens utilizadas no presente estudo, verifica-se que neste alcançou-se maiores eficiências de remoção utilizando-se menores dosagens de coagulante tanino.

Lucyk *et al.* (2015) no tratamento de efluente proveniente de abatedouro de aves utilizando 100 mg.L^{-1} de tanino como coagulante obtiveram eficiência de remoção de turbidez acima de 90 %, para uma amostra bruta de 819 uT. Pode-se observar que no presente estudo alcançaram-se eficiências de remoção acima de 90% com dosagens inferiores à utilizada por Lucyk *et al.* (2015).

Ribeiro *et al.* (2015) testaram três diferentes concentrações de coagulante tanino (40, 80 e 160 mg.L^{-1}) para esgoto sanitário com turbidez inicial de 140.83 uT, alcançando a mais alta eficiência de remoção de turbidez (92.9 %) com a dosagem 160 mg.L^{-1} , sendo esta muito superior à dosagem ótima obtida no presente estudo.

O valor da turbidez inicial do efluente em estudo apresentava-se bem abaixo (35 uT) dos valores reportados pelos autores acima, podendo esse fator justificar as elevadas eficiências de remoção alcançadas com menores dosagens de coagulante. Fernandes *et al.* (2015), estudando a aplicação do coagulante tanino em efluentes de lavagem de automóveis, afirmaram que a dosagem de coagulante é função da concentração de contaminantes presente no efluente bruto, isto é, para efluentes diluídos deve-se aplicar baixas dosagens de coagulante pois elevadas dosagens podem tornar a floculação ineficiente, enquanto efluentes com elevada concentração de contaminantes devem ser tratados com dosagens mais elevadas, para permitir a formação de flocos decantáveis. Aboulhassan *et al.* (2016), por sua vez, destacam que a dosagem de coagulante utilizada no processo deve ser proporcional à quantidade de colóides presentes no efluente.

Campanha B - Avaliação da eficiência da coagulação com coagulante tanino

Na Campanha B foram conduzidos dois tratamentos distintos. O Tratamento 1, onde foram empregados os processos de coagulação, floculação e sedimentação utilizando-se a dosagem ótima de 15 mg.L^{-1} do coagulante tanino, obtida a partir da Campanha A. E o Tratamento 2, onde

as amostras foram submetidas a uma filtração rápida em filtros de areia após terem passado pelos processos de coagulação/floculação/sedimentação.

Parâmetros físico-químicos

Na tabela 3 encontra-se a caracterização da amostra de efluente do UASB utilizada na Campanha B, juntamente com os resultados das análises realizadas com as amostras coletadas após o Tratamento 1, e o Tratamento 2.

Tabela 3. Caracterização das amostras de efluente do UASB (n=1), das amostras de sobrenadante do Tratamento 1 (coagulação) (n=3), e das amostras após o Tratamento 2 (coagulação + filtração) (n=3), e a porcentagem de remoção alcançada para cada parâmetro estudado.

Parâmetro	Efluente UASB	Coagulação (T1)	Coagulação + Filtração (T2)	Remoção (%)	
Turbidez (uT)	82	10.7 ± 1.07 (10.0*)	2.5 ± 0.43 (17.5*)	86.9	96.9
Cor aparente (uC)	479	79.3 ± 8.14 (10.3*)	38.3 ± 1.15 (3.0*)	83.4	92.0
Cor verdadeira (uC)	80	21.3 ± 2.08 (9.8*)	22.3 ± 3.21 (14.4*)	73.4	72.1
DQO (mg.L ⁻¹)	79	39 ± 10.87 (28.0*)	30 ± 9.86 (33.0*)	50.6	62
Fósforo total (mg.L ⁻¹)	1.11	1.20 ± 0.51 (42.4*)	1.40 ± 0.21 (14.7*)	-	-
pH	7.1	7.7 ± 0.01 (0.15*)	7.9 ± 0.08 (1.0*)	-	-
Temperatura (°C)	16.6	15.4 ± 0.06 (0.37*)	15.8 ± 0.10 (0.63*)	-	-

*Coeficiente de variação. n = número de repetições.

Di Bernardo e Dantas (2005) alegam que a temperatura da água tem efeito significativo nos processos de coagulação, floculação e sedimentação, pois a redução da temperatura resulta no aumento da viscosidade da água o que reduz a velocidade de formação de espécies hidrolisadas. Segundo Richter (2011) a variação da viscosidade da água devido à mudança de temperatura altera os gradientes de velocidade aplicados nas etapas de mistura rápida e floculação. Desta forma, a temperatura de 16.6 °C apresentada pelo efluente do UASB no dia dos experimentos pode ter prejudicado um pouco o desempenho do processo de coagulação e floculação.

De acordo com os dados apresentados na tabela 3, observa-se que não houve uma variação significativa no valor do pH do efluente após os Tratamentos 1 e 2, que variou de 7.1 a 7.9. Sendo que esta faixa de pH representa a faixa ótima de pH para o lançamento do efluente, estabelecido pela resolução CONAMA 430/2011, ou para posterior tratamento biológico, não necessitando o ajuste do pH após a coagulação.

As eficiências de remoção de turbidez variaram de 86.9 % a 96.9 % para os Tratamentos 1 e 2, respectivamente. Tais valores são semelhantes aos encontrados nos trabalhos de Beltrán-Heredia e Sánchez-Martín (2009), que realizaram coagulação e floculação de esgoto sanitário com coagulante tanino, e obtiveram valores de remoção de turbidez acima de 80%, e de Sánchez-Martín *et al.* (2010), que utilizaram coagulante a base de tanino no tratamento de esgoto sanitário. Os autores observaram ainda que a implementação de filtros lentos de areia após a sedimentação aumentou a remoção de turbidez, alcançando quase 100 % de remoção de sólidos suspensos. Os filtros de areia, utilizados no Tratamento 2, tem alta eficiência na remoção de sólidos suspensos, explicando o aumento na remoção do parâmetro turbidez do efluente, uma vez que o parâmetro turbidez é diretamente relacionado à presença de sólidos suspensos.

A remoção de cor aparente foi de 83.4 % no Tratamento 1 e de 92 % no Tratamento 2. Comparando-se ao estudo de Pelegrino (2011), que empregou o coagulante tanino no pós-tratamento de efluente de UASB por flotação, e alcançou uma eficiência máxima de remoção de cor aparente de 88.28 % utilizando dosagem de 170 mg.L⁻¹ de coagulante tanino, o presente trabalho apresentou melhor relação custo-benefício uma vez que alcançou remoção de 83.4 % com uma dosagem de 15 mg.L⁻¹ de coagulante tanino. No valor do parâmetro cor aparente pode estar inclusa uma parcela devido à turbidez da água, ou seja, sem a separação dos sólidos em suspensão, os quais são removidos no filtro de areia (Sperling, 2014). Fato este que resultou em um acréscimo na eficiência de remoção de cor aparente após passagem do efluente no filtro de areia, alcançando uma eficiência final de remoção de 92 %.

De acordo com os resultados de cor verdadeira, apresentados na tabela 3, é possível afirmar que os processos de coagulação/floculação/sedimentação permitiram alcançar eficiente remoção para o parâmetro mencionado (73.4 %). Comparando os resultados dos Tratamentos 1 e 2 observa-se que a adição do processo de filtração ao tratamento não resultou em acréscimo na remoção de cor verdadeira, atingindo um percentual de remoção de 72.2 % após filtração. Resultado este que pode ser explicado pelo fato que a cor verdadeira é proveniente dos sólidos dissolvidos presentes no efluente, os quais não são eficientemente removidos nos filtros de areia.

Os resultados alcançados para o parâmetro DQO foram de 50,6 % de remoção para o Tratamento 1 e de 62 % de remoção para o Tratamento 2. Ribeiro *et al.* (2015), realizando coagulação de esgoto sanitário com tanino para remoção de matéria orgânica e nutrientes (nitrogênio e fósforo), utilizando a dosagem ótima de 40 mg.L⁻¹, alcançaram eficiências de remoção de 66.1 %, 35.7 % e 16.4 % para os parâmetros DQO, nitrogênio total e fósforo total, respectivamente.

Com relação ao parâmetro fósforo total do efluente é possível observar que não houve remoção. Os resultados mostram ainda um aumento na concentração de fósforo total no efluente após o Tratamentos 1 e 2. Se tratando de um pós-tratamento utilizando-se o coagulante tanino, a não remoção de fósforo total pode ser considerada esperada. Ribeiro *et al.* (2015) e Pelegrino (2011)

em seus estudos também verificaram deficiência do coagulante tanino na remoção de fósforo total de esgoto sanitário, porém os autores conseguiram alcançar uma máxima eficiência de remoção de fósforo total de 16.4 % e 61.2 %, respectivamente.

Parâmetros biológicos

Na tabela 4 são apresentados os valores das concentrações de microrganismos indicadores de contaminação fecal nas amostras coletadas do reator UASB, e os valores das concentrações destes microrganismos após a coagulação/floculação/sedimentação com tanino (Tratamento 1) e após a filtração das amostras já sedimentadas (Tratamento 2), além de apresentar as eficiências de remoção.

Tabela 4. Caracterização das amostras de efluente do reator UASB (n=1), das amostras de sobrenadante do Tratamento 1 (coagulação) (n=3), e das amostras após o Tratamento 2 (coagulação + filtração) (n=3), juntamente com os logs de remoção alcançada com cada tratamento.

Parâmetro	Efluente UASB	Coagulação (T1)	Coagulação + Filtração (T2)	Log de remoção	
				T1	T2
CT (UFC/100 mL)	14.5x10 ⁵	66.3x10 ³ ± 31214 (*31)	5.6x10 ³ ± 4619 (*154)	1.37 ± 0.19 (14*)	2.5 ± 0.33 (13*)
<i>E.coli</i> (UFC/100 mL)	8.9x10 ⁵	40.6x10 ³ ± 9074 (*18)	4x10 ³ ± 1732 (*58)	1.35 ± 0.09 (6.9*)	2.37 ± 0.17 (7*)

*Coeficiente de variação. n = número de repetições.

Comumente os reatores UASB apresentaram baixa eficiência na remoção de microrganismos patogênicos, desta forma, os efluentes proveniente desses reatores podem apresentar concentração elevada desses microrganismos.

Verifica-se na tabela 4 que o Tratamento 1, coagulação com tanino, alcançou remoções de 1.37 ± 0.19 logs para CT e 1.35 ± 0.09 logs para *E. Coli*. Lea (2014) destaca que o processo de coagulação utilizando coagulante natural (Moringa) é capaz de produzir efluente de alta qualidade, porém não garante 100% de remoção de patógenos, necessitando ainda de um tratamento adicional.

Em relação a aplicação do Tratamento 2, coagulação com tanino e posterior filtração rápida em filtro de areia, pode-se observar que foram alcançadas remoções de 2.5 ± 0.33 logs para CT e 2.37 ± 0.17 logs para *E. Coli*, sendo estes maiores que os logs de remoção alcançados pela aplicação do Tratamento 1. Corroborando, portanto, com os resultados de PRITCHARD et al. (2010), que estudando o uso dos filtros de areia como tratamento secundário de água coagulada, alcançaram

melhora significativa na remoção dos parâmetros turbidez e *E. Coli* da água testada. Em seus estudos, a combinação dos processos de coagulação com coagulante natural e filtração em filtros de areia resultou em máximas eficiências de remoção de 97% para turbidez e 98% para *E. Coli*.

De acordo com Sperling (2014) os parâmetros microbiológicos dos efluentes sanitários apresentam-se, na sua maior parte, na forma de sólidos em suspensão. Os processos de coagulação e filtração apresentam alto desempenho na remoção deste tipo de sólido, o que resulta simultaneamente em uma considerável remoção dos microrganismos patogênicos.

Análise estatística da potencialidade da filtração após coagulação com tanino

Para a análise da potencialidade do uso da filtração após a coagulação com tanino, utilizou-se o Teste T de Student, onde foi analisada a diferença estatística entre o processo de coagulação/floculação/sedimentação com tanino (Tratamento 1) e processo de coagulação/floculação/sedimentação com tanino seguido de filtração (Tratamento 2) a partir das diferenças estatísticas entre as médias de cada parâmetro (tabela 5).

Tabela 5. Teste T de Student entre as amostras coaguladas com tanino (Tratamento 1) e as amostras após a filtração (Tratamento 2).

Parâmetro	Coagulação (T1)	Coagulação + Filtração (T2)	Valor T	Valor P
Turbidez (uT)	10.69	2.49	16.76	0.003539*
Cor aparente (uC)	79.33	38.33	8.2	0.014548*
Cor verdadeira (uC)	21.77	22.33	-0.654	0.579916
DQO (mg.L ⁻¹)	39	30	2.34	0.143896
CT (UFC/100 mL)	66333.33	5666.67	3.0663	0.091928
<i>E. Coli</i> (UFC/100 mL)	40666.67	4000	6.188	0.025135*

*Significativo pelo teste T ($p \leq 0.05$). ns = não significativo pelo teste F ($p \geq 0.05$).

A partir dos resultados obtidos pelo Teste T de Student (tabela 5), pode-se observar que só houve diferença estatística entre os Tratamentos 1 e 2 com relação a turbidez, cor aparente e *E. Coli*, parâmetros esses relacionados com a presença de partículas no efluente. Os demais parâmetros, cor verdadeira, DQO e CT não apresentaram diferença estatística. Desta forma, pode-se afirmar que o processo de filtração após a coagulação com o coagulante natural tanino apresentou maior potencialidade para a remoção de turbidez, cor aparente e *E. Coli* do efluente em estudo.

A filtração tem sido muito utilizada após processos biológicos ou químicos para a remoção de sólidos suspensos remanescentes, o que inclui também a matéria orgânica particulada (Gobbi, 2010). A eficiência da filtração para retenção de partículas suspensas da água pode ser a explicação para os aumentos significativos alcançados na remoção de turbidez, cor aparente e *E. Coli* do efluente em estudo.

As análises estatísticas realizadas por Hamoda *et al.* (2004), que estudaram o uso de filtros de areia no tratamento terciário de águas residuárias, mostram um significativo aprimoramento da qualidade dos efluentes, em relação aos parâmetros de sólidos suspensos totais, sólidos suspensos voláteis, DQO e DBO, sendo que a alta eficiência de remoção de DQO e DBO pode ter sido resultado da remoção dos sólidos suspensos presentes no efluente.

Conclusão

A aplicação do processo de coagulação, floculação e sedimentação utilizando coagulante natural à base de tanino é uma promissora alternativa para elevar a qualidade de efluentes de reatores UASB. Utilizando-se 15 mg.L⁻¹ de coagulante tanino e velocidade de sedimentação de 0.6 cm.min⁻¹, alcançou-se 86.9 %, 83.4 %, 73.4 % e 50.6 %, de remoção dos parâmetros turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO, respectivamente.

Os filtros de areia após coagulação com tanino são alternativas eficientes para a remoção das partículas suspensas remanescentes no efluente, potencializando, dessa forma, a remoção de organismos patogênicos. Com tal combinação, foi possível obter reduções significativas dos parâmetros turbidez, cor aparente e *E. Coli*, atingindo 96.9 %, 92 % e 2.37 ± 0.17 log de remoção, respectivamente.

O processo de coagulação com tanino, associado ou não ao processo de filtração, não permitiu a remoção de fósforo total.

Referências bibliográficas

- Aboulhassan, M. A., Souabi, S., Yaacoubi, A., Baudu, M. (2016) Coagulation efficacy of a tannin coagulant agent compared to metal salts for paint manufacturing wastewater treatment, *Desalination and Water Treatment*, **57**(41), 19199-19205. doi: 10.1080/19443994.2015.1101016
- APHA. AWWA, WPCF. (1999) Standard Methods for the Examination of Water and wastewater. 20th edition, Washington, USA.
- Beltrán-Heredia, J., Sánchez-Martín, J. (2009) Municipal wastewater treatment by modified tannin flocculant agent, *Desalination*, **249**(1), 353-358. doi: 10.1016/j.desal.2009.01.039
- Beltrán-Heredia, J., Sánchez-Martín, J., Gómez-Muñoz, M. C. (2010) New coagulant agents from tannin extracts: Preliminary optimisation studies, *Chemical Engineering Journal*, **162**(3), 1019-1025. doi: 10.1016/j.cej.2010.07.011

- Brasil, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997) *NBR 13969 – Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos: Projeto, construção e operação*. Rio de Janeiro.
- Brasil, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2011) *Resolução n. 430 – Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente*. Diário Oficial da União, Brasília. Acesso em 23 de março de 2016, disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>
- Cardoso, F. K., Sperling M. V., Rodrigues, L. A., Barbosa, M. M. (2003) Avaliação da eficiência em termos de remoção de DBO e DQO de duas estações de tratamento de esgotos em escala real, envolvendo reatores anaeróbios e pós-tratamento em lagoa facultativa, *22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Joinville, 14 a 19 de setembro.
- Chernicharo, C. A. L. (1997) *Anaerobic reactors*, v. 4, IWA publishing, Belo Horizonte: UFMG, 184 pp.
- Coral, L. A., Bergamasco, R., Bassetti, F. J. (2009) Estudo da viabilidade de utilização do polímero natural (Tanfloc) em substituição ao sulfato de alumínio no tratamento de águas para consumo, *International Workshop Advances in Cleaner Production*, São Paulo.
- Di Bernardo, L., Dantas, A. (2005) *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*, 2ª ed., Rima, São Carlos, SP, 107 pp.
- Fernandes, M., Skoronski, E., Trevisan, V., Alves, M. V., Ely, C., João, J. J. (2015) Aplicação de tanino como coagulante no reuso da água de lavagem de automóveis e a utilização do lodo na agricultura, *REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA*, **9**(1). Acesso em 30 de setembro de 2015, disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mauricio_Alves/publication/291153332_APLICACAO_DE_TANINO_COMO_COAGULANTE_NO_REUSO_DA_AGUA_DE_LAVACAO_DE_AUTOMOVEIS_E_A_UTILIZACAO_DO_LODO_NA_AGRICULTURA/links/569e653308ae4af525445491.pdf
- Di Bernardo, L., Centurione Filho, P. L. (2003) Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **8**(1), 39-44. Acesso em 23 de março 2016, disponível em: <http://www.abes-dn.org.br/publicacoes/engenharia/resaonline/v8n12/v8n12n04.pdf>
- Gobbi, S. A. (2010) *Remoção de ovos de helmintos de esgotos secundários, por meio de filtros rápidos de areia, carvão antracitoso e zeólito para reúso agrícola e urbano não potável*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Sanitária, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 99 pp.
- Hamoda, M. F., Al-Ghusain, I., Al-Mutairi, N. Z. (2004) Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse, *Desalination*, **164**(3), 203-211. doi: 10.1016/S0011-9164(04)00189-4
- Konradt-Moraes, L., Bergamasco, R. (2007) Avaliação da eficiência de remoção de cor e turbidez, utilizando como agente coagulante os taninos vegetais, com a finalidade de obtenção de água tratada, *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental*, Belo Horizonte, Brasil.
- Lea, M. (2010). Bioremediation of turbid surface water using seed extract from Moringa oleifera Lam.(drumstick) tree. *Current protocols in microbiology*, 1G-2. doi: 10.1002/9780471729259.mc01g02s16
- Lucyk, N., Hermes, E., Pujarra, S., da Silva, R. P., Simioni, R. J., Zenatti, D. C. (2015) Uso de coagulantes naturais no tratamento de coagulação/floculação de efluente proveniente de abatedouro de aves, *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, **4**, 576-587. doi: 10.19177/rgsa.v4e02015576-587
- Metcalf, L., Eddy, H. P. (2003) *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*, 4a ed., New York: McGraw-Hill, 1819 pp.
- Ozacar, M., Sengil, I. A. (2003) Evaluation of tannin biopolymer as a coagulant aid for coagulation of colloidal particles, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **229**(1) 85-96. doi: 10.1016/j.colsurfa.2003.07.006
- Pelegrino, E. C. F. (2011) *Emprego de coagulante à base de tanino em sistema de pós-tratamento de efluente de reator UASB por flotação*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 161 pp.

- Piantá, C. A. V. (2008) *Emprego de coagulantes naturais como alternativa ao uso do sulfato de alumínio no tratamento de água*, Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 74 pp.
- Pritchard, M., Craven, T., Mkandawire, T., Edmondson, A. S., O'neill, J. G. (2010) A comparison between Moringa oleifera and chemical coagulants in the purification of drinking water—An alternative sustainable solution for developing countries, *Physics and Chemistry of the Earth*, **35**(13), 798-805. doi: 10.1016/j.pce.2010.07.014
- Reali, M. A. P., Penetra, R. G., Campos, J.R. (1998) Influência da floculação na flotação de efluentes de reatores anaeróbios (UASB), *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Lima, Peru.
- Ribeiro, M. R. P., Simioni, D., Pitol-Filho, L. (2015) Uso de tanino para remoção de nutrientes do esgoto sanitário da estação de tratamento de efluentes Nereu Ramos em Jaraguá do Sul-SC, *Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial*, **8**(1), 161-177. doi: 10.18624/e-tech.v8i1.487
- Richter, C. A. (2009) *Água Métodos e Tecnologia de Tratamento*. Editora Edgard Blucher. São Paulo.
- Sánchez-Martín, J., Beltrán-Heredia, J., Solera-Hernández, C. (2010) Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant. Pilot plant trials, *Journal of environmental management*, **91**(10), 2051-2058. doi: 10.1016/j.jenvman.2010.05.013
- Santos, H. R. (2001) *Aplicação de coagulantes no afluente do reator anaeróbio de leite expandido alimentado com esgoto sanitário*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 183 pp.
- Silva, M. E. R., Aquino, M. D., Santos, A. B. (2007) Pós-tratamento de efluentes provenientes de reatores anaeróbios tratando esgotos sanitários por coagulantes naturais e não-naturais, *Revista Tecnologia*, **28**(2), 178-190. Acesso em 12 de fevereiro de 2016, disponível em: <http://periodicos.unifor.br/tec/article/viewFile/55/4464>
- Silva, T. S. S. (1999) *Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em águas de abastecimento e de esgoto*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação de Saúde Pública, Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 85 pp.
- Sousa, J. T., Haandel, A. V., Lima, E. P. C., Henrique, I. N. (2004) Utilização de wetland construído no pós-tratamento de esgotos domésticos pré-tratados em reator UASB, *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **9**(4), 285-290. doi: 10.1590/S1413-41522004000400004
- Sperling, M. V. (2014) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*, v. 1, Belo Horizonte: UFMG, 472 pp.
- Vaz, L. G. L., Klen, M. R. F., Veit, M. T., Silva, E. A., Barbiero, T. A., Bergamasco, R. (2010) Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia, *Eclética Química*, **35**(4), 45-54. doi: 10.1590/S0100-46702010000400006
- Zar, Jerrold H. (1999) *Biostatistical analysis*. Pearson Education India.