

TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO UTILIZANDO COAGULANTE NATURAL SEGUIDO DE FILTRO ORGÂNICO¹

PAOLA ALFONSA VIEIRA LO MONACO^{2*}, ANTONIO TEIXEIRA DE MATOS³, IVAN CÉLIO ANDRADE RIBEIRO⁴, ANA PAULA DA SILVA BATISTA⁵, SUYMARA TOLEDO MIRANDA⁴, VALDEIR EUSTÁQUIO JÚNIOR⁶

RESUMO - A utilização de coagulantes naturais e filtros orgânicos produzidos no local e com baixo custo financeiro podem proporcionar atenuação nos problemas lançamento de águas residuárias, sem tratamento, em corpos hídricos receptores. Avaliou-se nesse trabalho a eficiência do processo de coagulação, utilizando-se o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no preparo do extrato de sementes de moringa, seguida de filtração em serragem de madeira, no tratamento de esgoto sanitário. Ao reservatório contendo 150L de esgoto sanitário foi adicionada a solução do extrato de sementes de moringa preparada com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $0,011 \text{ mol L}^{-1}$, numa concentração de 2,2 gramas de sementes para cada litro de água residuária a ser tratada. O efluente coagulado foi aplicado em filtro orgânico, sendo o volume filtrado convertido em volume de poros. Análises físicas e químicas foram realizadas no afluente e efluente das duas estruturas de tratamento para a avaliação da eficiência de tratamento. Os tratamentos por coagulação seguidos de filtração proporcionaram remoções de 98,0; 75,3; 75,8; 75,0; 79,7; 59,0 e 88,3% de turbidez, Sólidos Totais, Sólidos Totais Fixos, Sólidos Totais Voláteis, Sólidos Suspensos Totais, Sólidos Suspensos Fixos e Sólidos Suspensos Voláteis e de 51,2; 88,7; 72,6; 33,5 e 38,5 de Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio, Fósforo, Nitrogênio e Sódio.

Palavras-chave: Coagulação. Filtração. Moringa. Serragem de madeira.

SEWAGE TREATMENT USING NATURAL COAGULANT FOLLOWED BY ORGANIC FILTER

ABSTRACT: The use of natural coagulants and organic filters locally produced and low financial cost can provide attenuation problems in discharge of wastewaters, without treatment, into watercourses. Was evaluated in this study the efficiency of the coagulation process, using the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the preparation of *Moringa* seed extract, followed by filtration sawdust in the treatment of sewage. In the tank of 150 L containing sewage was added a solution of the moringa seed extract prepared with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0.011 mol L^{-1} at a concentration of 2.2 grams of seed per liter of wastewater to be treated. The coagulated effluent was applied to organic filter and the filtrate volume was converted in pore volume. Physical and chemical analyses were carried out in the influent and effluent of the two treatment structure for the evaluation of treatment efficiency. The treatments by coagulation followed by filtration provided removals of 98.0, 75.3, 75.8, 75.0, 79, 7, 59.0 and 88.3% of turbidity, Total Solids, Total Fixed Solids, Total Volatile Solids, Total Suspended Solids, Suspended Solids Fixed and Volatile Suspended Solids and of 51.2, 88.7, 72.6; 33.5 and 38.5% of Biochemical Oxygen Demand, Chemical Oxygen Demand, Phosphorus, Nitrogen and Sodium.

Keywords: Coagulation. Filtration. Moringa. Sawdust.

*Autor para correspondência.

¹Recebido para publicação em 26/03/2012; aceito em 06/03/2014

Parte da Pesquisa de Pós-Doutorado da primeira autora, financiada pelo CNPq e realizada no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

²Doutora em Engenharia Agrícola, DEA/UFV. Professora do Instituto Federal do Espírito Santo – *campus* Santa Teresa, 29654-000, Santa Teresa-ES. paolalm@ifes.edu.br.

³Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, DPS/UFV. Professor do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. atmatos@ufv.br.

⁴Engenheiro(a) Agrícola e Ambiental, UFV. Mestrando(a) em Engenharia Agrícola, DEA/UFV. Ivan.ribeiro@ufv.br; suymara.miranda@ufv.br

⁵Estudante de Engenharia Agrícola e Ambiental, UFV. anapsbatista@gmail.com.

⁶Mestre em Engenharia Agrícola, DEA/UFV. vejuniior@yahoo.com.br.

INTRODUÇÃO

O sulfato de alumínio destaca-se como o coagulante químico mais utilizado no Brasil, pela alta eficiência na remoção de sólidos em suspensão da água e pelo seu relativo baixo custo. No entanto, ele pode tornar-se caro para áreas mais afastadas pela dificuldade de acesso e por dificultar a disposição final do lodo produzido nas estações de tratamento, já que o alumínio é um elemento químico tóxico às plantas.

A utilização de coagulantes naturais, produzidos no local e com baixo custo financeiro, pode proporcionar atenuação nos problemas associados ao consumo de água não potável, em pequenas comunidades ou em locais mais afastados, e diminuir o lançamento de águas residuárias, sem tratamento, em corpos hídricos receptores.

Muitos são os resultados de pesquisas comprovando a eficiência do extrato de sementes de moringa (*Moringa oleifera*), como agente coagulante, na remoção de turbidez (ABDULSALAM et al., 2007), cor (PRITCHARD et al., 2010) sólidos suspensos (BHATIA et al., 2007), surfactantes aniônicos (HEREDIA; MARTIN, 2009), corantes (HEREDIA et al., 2009), Demanda Química de Oxigênio (BHUPATAWAT et al., 2007) e até microrganismos (LO MONACO et al., 2010) em diversos tipos de águas residuárias.

Pesquisas têm sugerido, porém, que a adição de substâncias químicas no preparo do extrato de moringa pode proporcionar, ainda maior, eficiência da referida suspensão na clarificação de diversos tipos águas em tratamento (OKUDA et al., 2001; GHEBREMICHAEL et al., 2005). Nesse sentido, Lo Monaco et al. (2013) avaliaram o efeito da adição de diferentes sais (NaCl, KCl) e uma base ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) no preparo do extrato de sementes de moringa, utilizado como agente coagulante para a remoção de turbidez de esgoto sanitário. Os autores concluíram que, das três substâncias químicas utilizadas no experimento, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ foi o que demonstrou melhor capacidade de potencializar a ação coagulante das sementes *Moringa oleifera*.

Além da moringa, outras formas alternativas de tratamento de esgoto em pequenas comunidades têm sido pesquisadas. Dentre as opções de tratamento primário, tem sido utilizada a filtração em materiais orgânicos.

Resíduos orgânicos, oriundos de atividades agrícolas, podem ser boa opção para utilização como meio filtrante, devido à sua abundância, baixo custo de aquisição e, ainda, em razão da possibilidade de serem submetidos à compostagem após serem descartados dos filtros e, posteriormente, utilizados como fertilizante agrícola. Por essa razão, alguns resíduos utilizados como filtros orgânicos têm sido avaliados, tais como bagaço de cana-de-açúcar (LO MONACO et al., 2011a; MATOS et al., 2010); serragem de madeira (MAGALHÃES et al., 2006;

MATOS et al., 2010), casca de arroz (BRANDÃO et al., 2003), sabugo de milho triturado (LO MONACO et al., 2011a), casca de frutos do cafeeiro (BRANDÃO et al., 2003), fibra de coco (LO MONACO et al., 2009), além de pergaminho de grãos de café (MATOS et al., 2006; LO MONACO et al., 2011b). No entanto, de todos os materiais avaliados, a serragem de madeira tem apresentado os melhores resultados em diversos atributos analisados (LO MONACO et al., 2004; MAGALHÃES et al., 2006).

Diante dos ótimos resultados de remoção de diversos atributos de águas residuárias em filtros orgânicos, objetivou-se, com a realização deste trabalho, avaliar a eficiência do processo de coagulação, utilizando-se o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no preparo do extrato de sementes de moringa, seguida de filtração em serragem de madeira, no tratamento de esgoto sanitário.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Área Experimental de Tratamento de Resíduos Urbanos, do Departamento de Engenharia Agrícola, tendo como coordenadas geográficas: latitude 20° 45' 14" S, longitude 42° 52' 53" W e altitude média de 650 m. A água residuária utilizada nos ensaios foi coletada em reservatório, receptor de esgoto sanitário proveniente do bairro Acamari e adjacências, em Viçosa, MG, apresentando, inicialmente, turbidez média de 877,0 UNT.

A bancada para o tratamento do esgoto sanitário bruto foi constituída de tanque, com capacidade de 200 L, seguido de filtro orgânico.

O sistema de filtração foi constituído por uma tubulação de PVC de 250 mm, com área transversal de 463,8 cm² e 0,7 m de altura e tampão final, onde foi instalada uma válvula de gaveta na parte inferior para permitir a saída da água filtrada. Como material filtrante, optou-se pela serragem de madeira, que foi secada ao ar e passada em peneira, de forma a se obter partículas de diâmetro entre 2 e 3 mm, conforme recomendações de Lo Monaco et al. (2004). O material filtrante foi acondicionado no filtro de forma gradual, em camadas de 10 cm de espessura, sob compressão de 12.490 N m⁻² (pressão equivalente à proporcionada por um homem de 70 kg), até ser atingida a altura de 0,5 m. Para isso, utilizou-se um cilindro de ferro, de 8 kg e aproximadamente 9 cm de diâmetro.

Ao reservatório contendo 150 L de esgoto sanitário foi adicionada a solução do extrato de sementes de moringa preparada com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 0,011 mol L⁻¹, numa concentração de 2,2 gramas de sementes para cada litro de esgoto sanitário a ser tratado. Essa concentração foi escolhida com base nos resultados apresentados por Lo Monaco et al. (2013), que obtiveram eficiência de 85% na remoção de turbidez

do esgoto sanitário, quando utilizaram a referida concentração de sementes no extrato coagulante.

Após duas horas de coagulação e posterior sedimentação dos flocos formados no interior do reservatório de reação e alimentação do filtro orgânico, iniciou-se o processo de saturação do filtro com o efluente. A saturação foi constatada pelo acúmulo de água na superfície, uma vez que havia cessado o processo de infiltração. Depois de saturado, a válvula posicionada no fundo do filtro foi aberta e, a partir daí, o processo de filtração foi contínuo, mantendo-se uma carga hidráulica de 0,20 a 0,25 m do esgoto sanitário coagulado/decantado acima da superfície do material filtrante.

A partir do conhecimento do volume total do filtro, ocupado pela massa de material filtrante e porosidade drenável (obtida em laboratório), foi possível calcular o volume de poros do filtro, ou seja, volume de espaços vazios no material filtrante, utilizando-se a Equação 1.

$$V_p = (P \cdot V_t) \quad \text{Eq. (1)}$$

em que,

V_p – volume de poros (adimensional);
 V_t – volume total da camada filtrante (cm^3); e
 P – porosidade do material da coluna ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Um total aproximado de 82 litros de esgoto sanitário foram filtrados, o que correspondeu a seis volume de poros, sendo o efluente coletado, em sequência, utilizando-se frascos plásticos com capacidade para 1 L. Cada volume de poros correspondeu a 13,6 L. Assim, as amostras eram coletadas entre a filtragem de 13,0 a 14,0 L para formação da amostra relativa ao referido número de volume de poros.

Amostras do esgoto sanitário coagulado/decantado e efluente do filtro orgânico foram submetidas às análises físicas e químicas, as quais foram executadas em conformidade com recomendações contidas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2005), no Laboratório de Qualidade de Água do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Na Tabela 1 estão detalhadas as análises e os respectivos métodos que foram utilizados.

Tabela 1. Variáveis avaliadas e os respectivos métodos que foram utilizados nas análises.

Variáveis	Método/equipamento
Turbidez	Turbidímetro de bancada
pH	Peagâmetro de bancada
Condutividade elétrica	Condutivímetro de bancada
Demanda bioquímica de oxigênio ($\text{DBO}_{\text{total}}$)	Método iodométrico (Processo Winkler)
Demanda química de oxigênio (DQO)	Oxidação química em refluxo aberto
Sólidos totais (ST)	
Sólidos Totais Fixos (SFT)	
Sólidos Totais Voláteis (SVT)	
Sólidos suspensos totais (SST)	Gravimétrico
Sólidos Suspensos Fixos (SSF)	
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)	
Nitrogênio total (N_{Total})	Processo semimicro Kjeldahl
Fósforo total (P_{Total})	Espectrofotometria
Sódio	
Potássio	Fotometria de chama

Após a conversão do volume efluente dos filtros orgânicos em volume de poros (Eq. 1), foram obtidas curvas relacionando essa variável com as apresentadas na Tabela 1.

Análises de regressão foram utilizadas para obtenção de equações matemáticas que possibilitassem a estimativa, para cada tratamento imposto, do desempenho do sistema de filtragem, tendo como variável independente o volume de poros de percolado dos filtros orgânicos. Considerou-se satisfatório o ajuste que proporcionou coeficiente de determinação maior que 70% e significância mínima de 5% de probabilidade nos coeficientes. Para realizar a análise de regressão foi utilizado o programa Sigma Plot 9.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão apresentadas características físicas de amostra de esgoto sanitário bruto, após submetido à coagulação/sedimentação (afluente do filtro) e efluente do filtro orgânico, além das eficiências na remoção dessas variáveis.

Nas Figuras 1 a 8 estão apresentados os modelos ajustados, obtidos dos atributos físicos do efluente do filtro orgânico, e, nos modelos em que não houve ajustes, apresenta-se apenas a média dos atributos em função do volume de poros percolado.

Tabela 2. Valores das variáveis físicas em amostra de esgoto sanitário bruto (ESB), após a coagulação/decantação (AC/D) (afluente do filtro) e efluente do filtro orgânico, com as respectivas eficiências de remoção.

AMOSTRAS	CE dSm ⁻¹	Turbidez UNT	ST	STF	STV	SST	SSF	SSV
ESB (1)	0,727	877,0	2.377,0	760,0	1617,0	414,0	122,0	292,0
AC/D (2)	0,737	231,0	681,0	176,0	505,0	206,0	4,0	202,0
Eficiência	-	(-) 73,6%	(-) 71,3%	(-) 76,8%	(-) 68,7%	(-) 50,2%	(-) 96,7%	(-) 30,8%
VP ₁	0,771	31,7	1.109,0	266,0	843,0	40,0	18,0	22,0
Eficiência em relação a:	1 -	(-) 96,4%	(-) 53,3%	(-) 65,0%	(-) 47,9%	(-) 90,3%	(-) 85,2%	(-) 92,4%
VP ₂	0,691	38,5	791,0	145,0	646,0	80,0	30,0	50,0
VP ₃	0,727	24,2	647,0	100,0	547,0	62,0	18,0	44,0
VP ₄	0,740	20,4	672,0	201,0	471,0	58,0	14,0	44,0
VP ₅	0,758	19,8	675,0	202,0	473,0	10,0	4,0	6,0
VP ₆	0,748	17,5	587,0	184,0	403,0	84,0	50,0	34,0

*Em que, (-) significa remoção e (+) aumento.

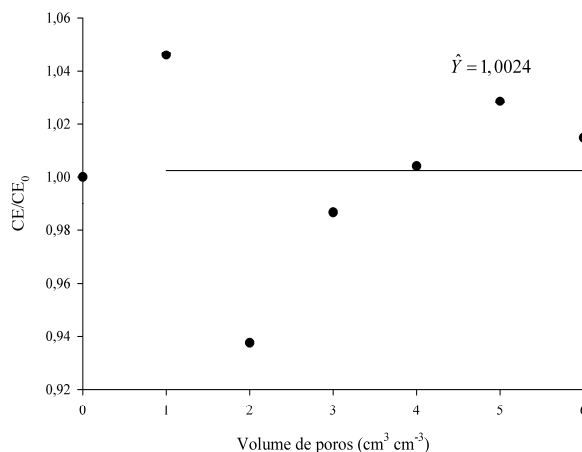
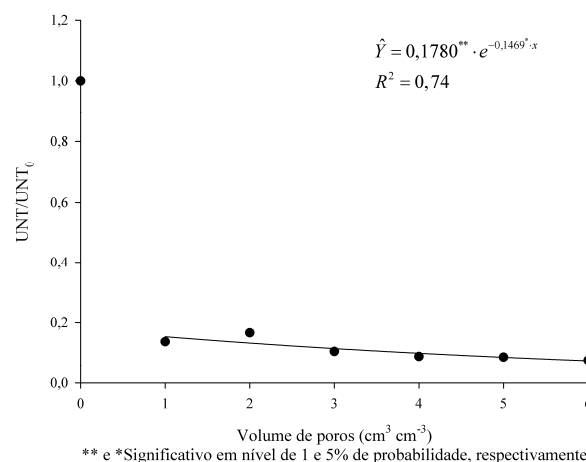


Figura 1. Média dos valores da concentração relativa da condutividade elétrica (CE) em função do volume de poros.



** e *Significativo em nível de 1 e 5% de probabilidade, respectivamente

Figura 2. Equação ajustada aos valores da concentração relativa da turbidez (UNT) em função do volume de poros.

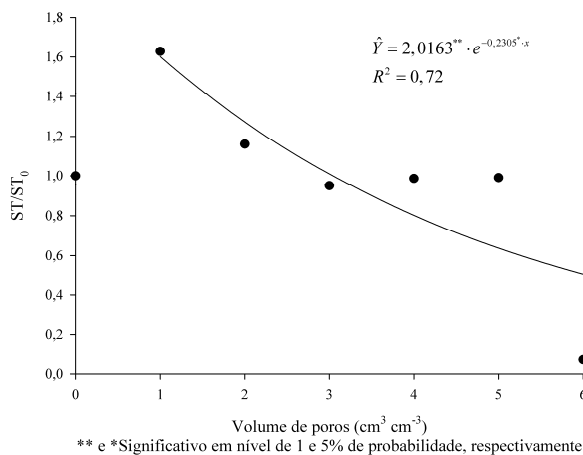


Figura 3. Equação ajustada aos valores da concentração relativa dos sólidos totais (ST) em função do volume de poros.

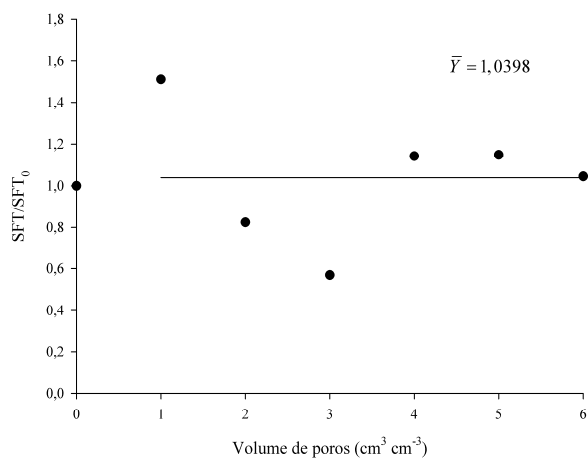


Figura 4. Média dos valores da concentração relativa dos sólidos fixos totais (SFT) em função do volume de poros.

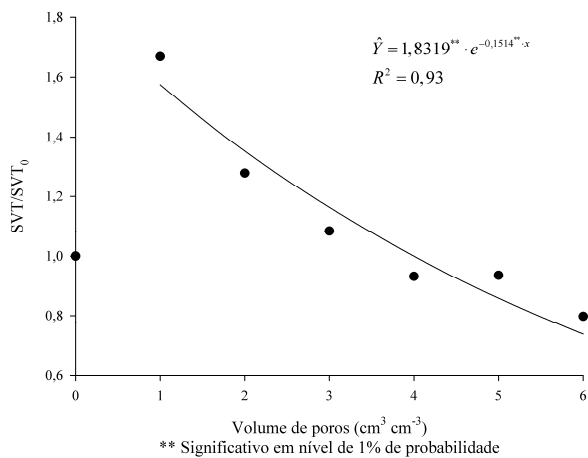


Figura 5. Equação ajustada aos valores da concentração relativa de sólidos voláteis totais (SVT) em função do volume de poros.

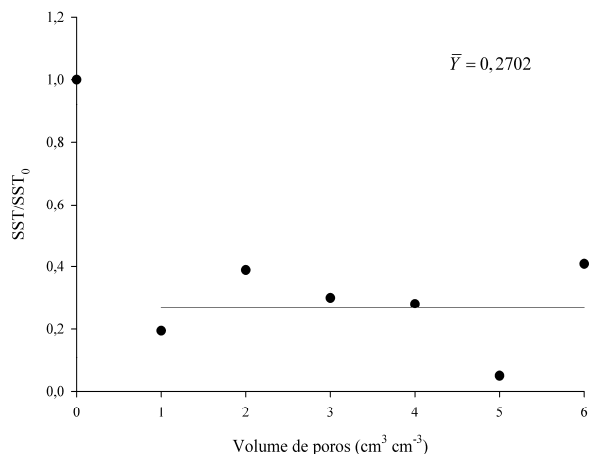


Figura 6. Média dos valores da concentração relativa dos sólidos suspensos totais (SST) em função do volume de poros.

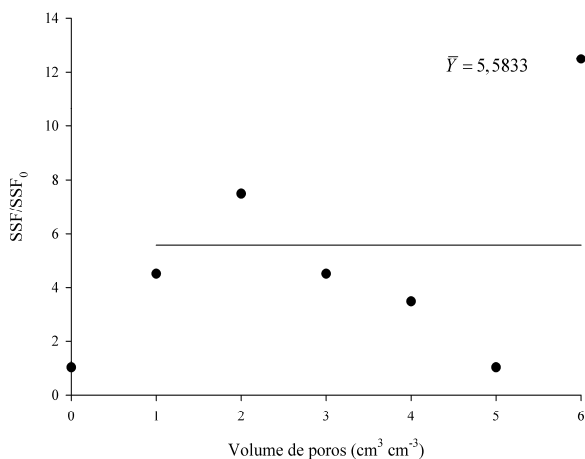


Figura7. Média dos valores da concentração relativa dos sólidos suspensos fixos (SSF) em função do volume de poros.

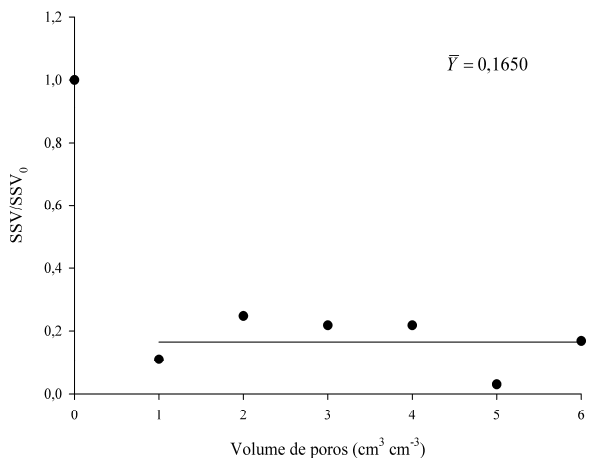


Figura 8. Média dos valores da concentração relativa dos sólidos suspensos voláteis (SSV) em função do volume de poros.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que a condutividade elétrica (CE) pouco se alterou após a coagulação. Durante a filtração da água residuária coagulada, não foi obtido nenhum ajuste, apresentando-se a média das concentrações relativas em função do volume de poros filtrado (Figura 1), que se apresentou igual à do afluente ($CE/CE_0=1,00$). No entanto, observa-se que houve pequeno aumento no seu valor do primeiro volume de poros, fenômeno também observado por Lo Monaco et al. (2011b), após filtrarem água residuária do descascamento dos frutos do cafeeiro (ARC) em filtros de pergaminho. Os autores constataram que a condutividade elétrica efluente apresentou-se cerca de 2,4 vezes maior que a afluente e atribuíram esse fato à contribuição dos solutos liberados pelo próprio material constituinte do filtro.

A eficiência na remoção de turbidez com a coagulação/sedimentação foi de 73,4% (Tabela 2), valor satisfatório, porém inferior ao obtido por Lo Monaco et al. (2013), ao utilizarem a mesma dose de $Ca(OH)_2$ no preparo do extrato de sementes de moringa, no tratamento de esgoto sanitário, em escala laboratorial. A menor remoção pode ser atribuída ao fato de ter sido utilizado, neste experimento, a metade ($2,4 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$) da concentração de $Ca(OH)_2$ considerada como ótima ($4,84 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$) no preparo do extrato de sementes de moringa. Sabe-se que o aumento na concentração iônica favorece a coagulação de material sólido em suspensão, por reduzir a espessura da dupla camada difusa, assim, como neste trabalho utilizou-se a metade da concentração, houve diminuição em cerca de 10% na eficiência de remoção da turbidez do esgoto sanitário.

O filtro orgânico sozinho proporcionou eficiência de 83 a 92% na remoção da turbidez (UNT/UNT_0 entre 0,17 a 0,08) do esgoto sanitário coagulado/decantado, apresentando ajuste de equação exponencial decrescente (Figura 2) em relação ao volume de poros filtrado. Comparando-se com o esgoto sanitário bruto (1) com os resultados de turbidez obtidos na amostra relativa à do último volume de poros, obteve-se uma eficiência global de remoção de 98%. A elevada remoção da turbidez obtida está diretamente relacionada com a eficiente retenção de sólidos suspensos pelo filtro, conforme pode ser verificado na Tabela 2 e em outros diversos trabalhos realizados com filtros orgânicos (MAGALHÃES et al., 2005; 2006b; LO MONACO et al., 2009; 2011b).

Quanto aos sólidos totais (ST), observou-se elevada remoção após ocorrida a coagulação/decantação do esgoto bruto (Tabela 2). No entanto, após a filtração do primeiro volume de poros, a concentração dessa variável aumentou em 62,8% (Tabela 2) em relação ao afluente (esgoto sanitário coagulado/decantado), indicando haver grande contribuição de sólidos dissolvidos do próprio material filtrante para a água residuária em tratamento, já que dos 1.109 mg L^{-1} de sólidos totais, apenas 40 mg L^{-1} eram sólidos suspensos, sendo o restante (1.069 mg

L^{-1}) de sólidos dissolvidos. Apesar das concentrações de ST apresentarem um decaimento exponencial durante o processo de filtração (Figura 3), somente no terceiro volume de poros é que a concentração passou a ser menor que a do afluente dos filtros. Ainda assim, a eficiência na remoção de ST foi pouco expressiva, variando entre 0,8 a 13,8%. Resultados contrários foram obtidos por Lo Monaco et al. (2004), que obtiveram remoções de 60 a 70% e por Magalhães et al. (2006), que obtiveram remoção de 43 a 57% de ST em filtro constituído por serragem de madeira; por Lo Monaco et al. (2009) que obtiveram remoção entre 40 e 60% de ST, utilizando a fibra de coco; e por Lo Monaco et al. (2011a), que obtiveram eficiências na remoção de ST em torno de 55 e 60%, para o bagaço de cana-de-açúcar picado e o triturado de sabugo de milho, respectivamente, todos tratando água residuária de suinocultura (ARS). Há de se ponderar, no entanto que, comparando-se as características físicas do esgoto sanitário com as da água residuária de suinocultura, verifica-se que o esgoto sanitário possui maior proporção de SDT em relação aos ST que a ARS, o que proporciona menor eficiência de filtros orgânicos na remoção de ST. Esse fato também foi constatado por Lo Monaco et al. (2011b), ao avaliarem o desempenho de filtros constituídos de pergaminho de grãos de café no tratamento primário de águas residuárias do descascamento do frutos do cafeeiro.

A presença de sólidos fixos totais (SFT) e sólidos voláteis totais (SVT)) é um fator indicativo da presença de material inorgânico e orgânico, respectivamente, no esgoto sanitário. De acordo com dados apresentados na Tabela 2, observa-se que a coagulação/decantação do esgoto sanitário após a adição do extrato de sementes de moringa preparado em solução de $Ca(OH)_2$ foi eficiente, tanto na remoção do material orgânico (68,7%), como na de material inorgânico (76,8%). No entanto, durante o processo de filtração, os valores de concentração relativa de SVT no percolado dos filtros se mantiveram maiores que a do esgoto sanitário coagulado/decantado (afluente dos filtros), até o terceiro volume de poros (Figura 5). Somente a partir do quarto volume de poros é que começou haver remoção, porém, de forma pouco expressiva (Tabela 2). Já a concentração dos SFT apresentou elevada variabilidade (Tabela 2), obtendo-se apenas a média de sua concentração relativa (Figura 4). Observa-se que, de um modo geral, o filtro não contribuiu para a remoção de SFT, tendo o percolado apresentado aumento de apenas 4% na eficiência, quando comparado à do afluente ($SFT/SFT_0 = 1,0398$).

Analisando os processos de coagulação/decantação e o de filtração juntos, observa-se que o filtro orgânico pouco contribuiu para a remoção das variáveis ST, SFT e SVT, já que, ao final da filtração, houve remoção de apenas 13,8 e 20,2% de ST e SVT, respectivamente, a mais que o processo de coagulação/decantação. No caso dos SFT, após a

filtragem de seis volume de poros, não houve remoção, e sim, contribuição dessa variável no efluente do filtro, quando comparado ao afluente. Isso indica, em princípio, que para a remoção dessas variáveis, o filtro orgânico teria que ser substituído por mecanismos químicos e/ou biológicos de tratamento.

O sistema de tratamento constituído por coagulação/decantação seguido de filtração foi bastante eficiente na remoção de SST, já que na primeira etapa a remoção foi de 50,2% e, ao final do processo de filtração, de cerca de 60% (Tabela 2). Entretanto, em razão de não ter sido obtido um ajuste matemático para o processo de filtração, apenas a média desta variável (73%, ou seja $SST/SST_0 = 0,27$) foi representada (Figura 6). De acordo com o que está estabelecido na Resolução CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011), a eficiência mínima de remoção de SST deve ser de 20%, após desarenação. Dessa forma, o sistema de tratamento em avaliação atende à exigência da referida legislação.

De forma semelhante ao que já foi explicado em relação às variáveis SVT e SFT, os SSV e os SSF dão um indicativo, respectivamente, da quantidade de material orgânico e inorgânico presentes em uma amostra que é passível de sedimentação.

A coagulação/decantação do esgoto sanitário bruto, utilizando o extrato de sementes de moringa preparado em solução de Ca(OH)_2 proporcionou remoção de 30,8% de SSV (Tabela 2). Embora não se tenha obtido um ajuste matemático que explicasse o comportamento desta variável durante o processo de filtração (Figura 8), observou-se que, de um modo geral, a eficiência de remoção foi de 83,5%. Eficiente retenção de material orgânico em filtros orgânicos também foi constatada por Lo Monaco et al. (2004), utilizando filtros constituídos por serragem de madeira e Lo Monaco et al. (2011a) utilizando filtros constituídos por bagaço de cana-de-açúcar e triturado de sabugo de milho, ambos no tratamento de águas residuárias de suinocultura.

De maneira semelhante aos SFT, observou-se elevada remoção dos SSF após a coagulação/decantação do esgoto sanitário com extrato de sementes de moringa preparada em solução Ca(OH)_2 , o que pode ser atribuído à formação e precipitação de sais, principalmente aqueles à base de cálcio. Okuda et al. (2001), ao investigarem o mecanismo de coagulação do componente ativo extraído e purificado das sementes de *Moringa oleifera* com solução salina, no tratamento de água sintética contendo caulim, observaram que a moringa apresentou maior capacidade coagulante quando na presença de cátions bivalentes como o Ca^{+2} , Mg^{+2} e Ba^{+2} (soluções salinas preparadas de MgCl_2 , CaCl_2 e BaCl_2) e baixa capacidade de coagulação, quando na presença de sais do tipo KCl, NaCl e NH_4Cl . Segundo os autores, quando cátions bivalentes, como o Ca^{+2} , são adsorvidos ao componente ativo da coagulação (proteínas), possibilitam a ligação entre suas moléculas, formando matéria insolúvel (“estruturas em rede”) capaz de

executar uma “varredura”, ou seja, captura dos sólidos suspensos por interceptação. Assim, os autores sugerem que o mecanismo de coagulação parece ser o de varredura.

Durante todo o processo de filtração, observou-se que, tal como ocorrido em relação às variáveis SFT, o filtro não foi capaz de reter o material inorgânico (SSF), contribuindo, inclusive, para o aumento de sua concentração. Diante da variabilidade dos resultados, não foi possível obter um ajuste matemático, apresentando-se apenas a média da concentração relativa desta variável (Figura 7).

Na Tabela 3 estão apresentados resultados das análises químicas e bioquímicas no esgoto sanitário bruto, esgoto submetido à coagulação/decantação, no percolado do filtro orgânico e as eficiências de remoção das variáveis químicas e bioquímicas avaliadas. Nas Figuras 9 a 14 estão apresentados os modelos ajustados obtidos dos atributos químicos e bioquímicos do efluente do filtro orgânico e, nos modelos em que não houve ajustes, apresenta-se apenas a média dos atributos em função do volume de poros percolado.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3, observou-se um pequeno aumento no pH após a coagulação, provavelmente em razão do incremento de hidroxilas proporcionado pela adição do Ca(OH)_2 . Após a filtragem do primeiro volume de poros, o pH diminuiu consideravelmente, tal como ocorrido em trabalhos realizados por Lo Monaco et al. (2009) e Lo Monaco et al. (2011b), o que pode ser atribuído à solubilização de substâncias de caráter ácido do material filtrante. Mesmo assim, os dois processos de tratamento proporcionaram valores de pH entre 5 e 9, atendendo o padrão de lançamento de efluente em corpos hídricos, conforme consta na Resolução CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011).

A coagulação/decantação do esgoto sanitário bruto obtida com a adição do extrato de sementes de moringa preparado em solução de Ca(OH)_2 proporcionou remoções de 35,6% de DBO e 84,7% de DQO (Tabela 3). No entanto, após a filtração, houve incremento nos seus valores e somente a partir do terceiro volume de poros é que começou a haver remoção no filtro orgânico, com decaimento exponencial (Figuras 9 e 10). O fato dos valores de DBO e DQO efluente serem maiores que o afluente nos primeiros volumes de poros evidencia que o esgoto sanitário em percolação foi capaz de solubilizar e transportar grande quantidade de sólidos e solutos que podem ser oxidados por micro-organismos, no caso da DBO, e pelo dicromato de potássio, forte agente oxidante, no caso da DQO. Com o passar do tempo de operação do filtro, a quantidade desses materiais transportados vai esgotando-se e o material filtrante começa a reter os sólidos e solutos, fato que também pôde ser constatado por Lo Monaco et al. (2004) e (2011a), ao avaliarem a eficiência de filtros orgânicos no tratamento de águas residuárias de suinocultura. Ao final de 6 volumes de poros filtrados,

Tabela 3. Valores das variáveis químicas e bioquímicas no esgoto sanitário bruto (ESB), após a coagulação/decantação (AC/D) (afluente do filtro) e após a filtragem (efluente do filtro), com as respectivas eficiências de remoção.

AMOSTRAS	pH	mg L ⁻¹					
		DBO	DQO	P _T	N _T	Na	K
ESB (1)	7,16	526	5.445	11,81	107,65	65,0	16,0
AC/D (2)	7,49	337	832	4,15	85,22	75,0	20,0
Eficiência	-	(-) 35,6%	(-) 84,7%	(-) 64,8%	(-) 20,8%	(+)15,4%	(+)25%
VP ₁	5,29	691	1.624	7,11	41,86	50,0	35,0
Eficiência em relação a:	1 -	(+)31,2%	(-)70,2%	(-)39,8%	(-)61,1%	(-)23,0%	+218,7%
	2 -	(+)205%	(+)95,2%	(+)71,3%	(-)50,9%	(-)33,3%	(+)75,0%
VP ₂	6,69	391	1.030	6,81	52,33	35,0	14,0
Eficiência em relação a:	1 -	(-) 25,7%	(-) 81,0%	(-)42,3%	(-)51,4%	(-)46,2%	(-)12,5%
	2 -	(+) 15,9%	(+)23,8%	(+)64,0%	(-)38,6%	(-)53,3%	(-)30,0%
VP ₃	6,98	266	634	4,77	47,84	55,0	18,5
Eficiência em relação a:	1 -	(-) 49,5%	(-) 88,4%	(-)59,6%	(-)55,5%	(-)15,4%	(+)15,6%
	2 -	(-) 21,2%	(-) 23,8%	(+)14,9%	(-)43,9%	(-)26,7%	(-)7,5%
VP ₄	7,10	256	594	3,85	50,83	50,0	15,0
Eficiência em relação a:	1 -	(-) 51,4%	(-) 89,1%	(-)67,4%	(-)52,8%	(-)23,0%	(-)6,3%
	2 -	(-) 24,1%	(-) 28,6%	(-)7,2%	(-)40,3%	(-)33,3%	(-)25,0%
VP ₅	7,10	266	653	3,57	59,80	50,0	17,5
Eficiência em relação a:	1 -	(-) 49,4%	(-) 88%	(-)69,8%	(-)44,4%	(-)23,0%	(+)9,3%
	2 -	(-) 21,0%	(-) 21,4%	(-)13,9%	(-)29,8%	(-)33,3%	(-)12,5%
VP ₆	7,24	257	614	3,23	59,80	40,0	16,5
Eficiência em relação a:	1 -	(-) 51,2%	(-) 88,7%	(-)72,6%	(-)44,4%	(-)38,5%	(+)3,1%
	2 -	(-) 23,8%	(-) 26,2%	(-)22,2%	(-)29,8%	(-)46,7%	(-)17,5%

*Em que, (-) significa remoção e (+) aumento.

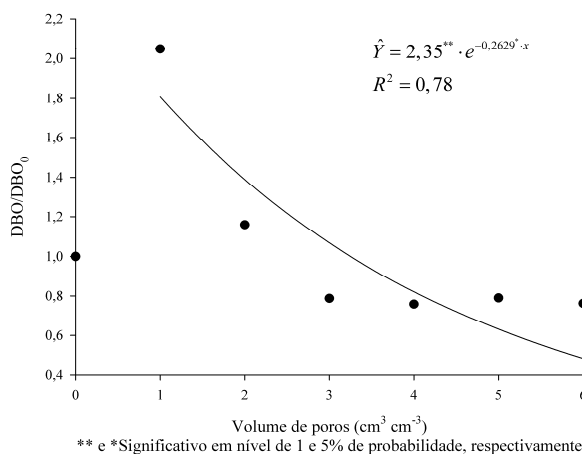


Figura 9. Equação ajustada aos valores da concentração relativa da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em função do volume de poros.

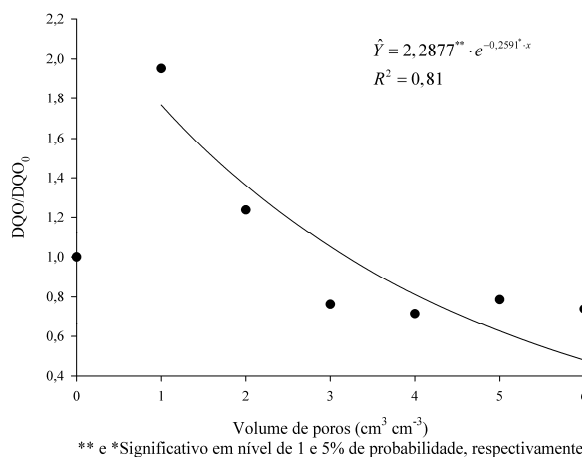


Figura 10. Equação ajustada aos valores da concentração relativa da demanda química de oxigênio (DQO) em função do volume de poros.

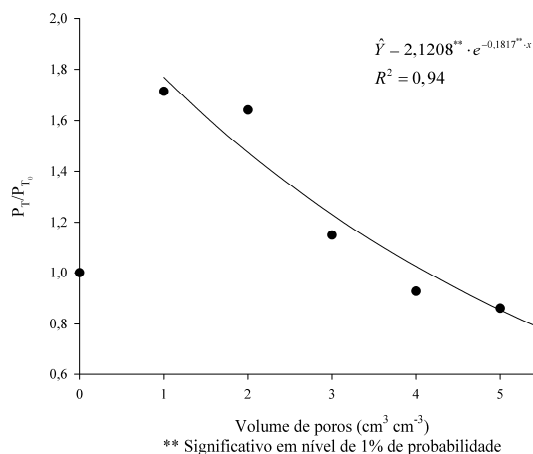


Figura 11. Equação ajustada aos valores da concentração relativa de fósforo (P) em função do volume de poros.

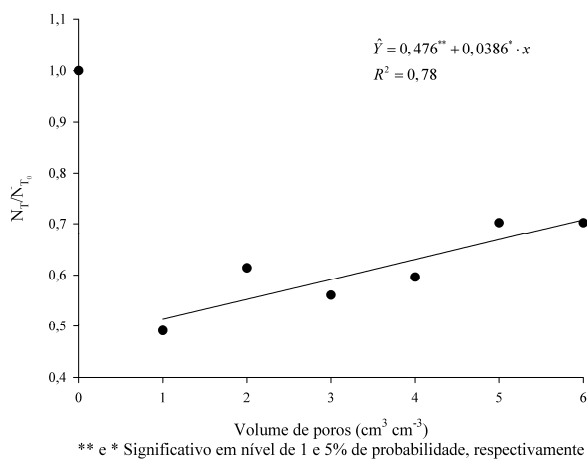


Figura 12. Equação ajustada aos valores da concentração relativa de nitrogênio (N) em função do volume de poros.

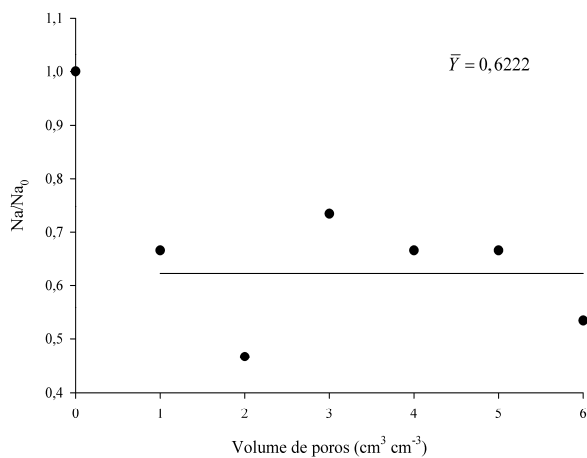


Figura 13. Média dos valores da concentração relativa de sódio (Na) em função do volume de poros.

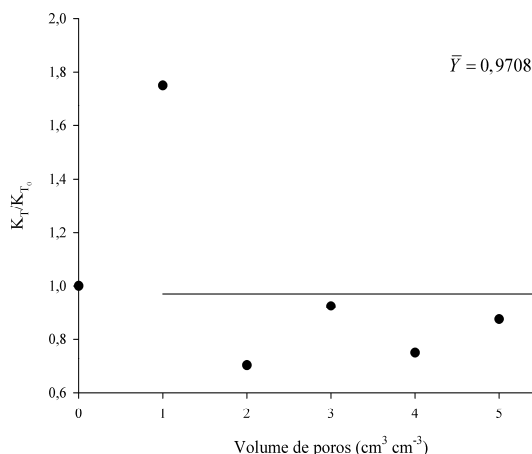


Figura 14. Média dos valores da concentração relativa de potássio (K) em função do volume de poros.

o filtro orgânico possibilitou a remoção de 23,8 e 26,2% de DBO e DQO, respectivamente, a mais que o processo de coagulação/decantação já havia removido (Tabela 3).

Analisando todo o sistema de tratamento, verifica-se que sua eficiência global foi de 51,2% e 88,7% na remoção de DBO e DQO, respectivamente. Na Resolução CONAMA 430/2011 (BRASIL, 2011), que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, estabelece-se que, dentre outras coisas, que a DBO₅ deva ser de, no máximo, 120 mg L⁻¹, sendo que este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência mínima de 60% na remoção de DBO, entretanto atende o que está estabelecido para DQO. Acredita-se que a inserção de uma estrutura que possibilite o tratamento secundário desse efluente possibilitaria resultados ainda melhores.

O tratamento por coagulação/decantação proporcionou elevada remoção de fósforo, porém pouco expressiva para N-total (Tabela 3). Considerando-se que a remoção de P é mais difícil e que é a principal causa de eutrofização em corpos hídricos receptores (MATOS, 2010), os resultados obtidos podem ser considerados muito bons.

Por tratar-se de esgoto sanitário bruto, o fósforo presente encontra-se nas formas particulada e solúvel, sendo que na forma solúvel, este pode estar na forma orgânica, na forma de polifosfatos e ortofosfatos (MARGUTI et al., 2008). Como a maior fração do fósforo solúvel no esgoto bruto está na forma orgânica, a elevada remoção obtida (64,8%) pode ser justificada pelo fato dos compostos orgânicos fosforados apresentarem peso molecular elevado e serem passíveis de serem removidos por processos de coagulação/decantação. Após o processo de filtração, nota-se que, tal como ocorrido para as variáveis DBO e DQO, houve aumento da concentração de P_T nos primeiros volumes de poros e somente no quarto volume de poros é que a concentração efluente passou a ser menor que a aflente, proporcionando um decaimento exponencial (Figura 11). Ao final de 6 volumes de poros filtrados, o filtro contribuiu com

22,2% de remoção a mais que o processo de coagulação/decantação. Essa remoção pode ser considerada baixa quando comparada com outros trabalhos nos quais se obteve remoções entre 58 e 70% de fósforo em filtros orgânicos tratando águas residuárias de suinocultura (LO MONACO et al., 2004; 2009; 2011a). No entanto, como a remoção de fósforo durante o processo de coagulação/decantação foi bastante elevada, a remoção no tratamento subsequente acabou se tornando menor, uma vez que a maior parte do fósforo orgânico já havia sido removido.

No caso do nitrogênio, como as formas predominantes em esgotos domésticos brutos são o orgânico e o amoniacal e que, do N amoniacal a maior parte está na forma de NH₄⁺ (se o pH for menor que 8, como no caso em análise) houve baixa remoção de N por coagulação/decantação (Tabela 3) já que, conforme explicado anteriormente, compostos na forma orgânica tendem a apresentar peso molecular maior, e portanto, são mais facilmente removidos por processos de coagulação/decantação. Após a filtração, foram obtidas remoções entre 50% (N/N₀ = 0,5) e 30% (N/N₀ = 0,7), sendo a maior remoção obtida no primeiro volume de poros. Acredita-se que essa elevada remoção no primeiro volume de poros esteja associada à adsorção do nitrogênio na forma amoniacal (NH₄⁺) pela serragem de madeira que, segundo Brandão et al. (2003), é um material filtrante substancialmente eletronegativo (ΔpH = -1,39), quando comparado com outros resíduos tais como, casca de arroz (ΔpH = -1,11), casca de café (ΔpH = -0,42), sabugo de milho (ΔpH = -0,63), fino de carvão vegetal (ΔpH = -0,66), sendo menor apenas quando comparado com o bagaço de cana-de-açúcar (ΔpH = -1,45). Esgotada a capacidade de adsorção pelo material filtrante, a eficiência de remoção passou a decrescer, ou seja, a concentração relativa passou a aumentar linearmente (Figura 12).

O tratamento por coagulação/decantação não proporcionou remoção de Na e K do esgoto sanitário, tendo, inclusive, contribuído para o aumento de suas concentrações (Tabela 3). Acredita-se que neste caso, o ligeiro aumento seja atribuído à margem de

erro nas análises, sendo considerado que apenas não houve remoção (concentração afluente seria igual à concentração efluente).

Após passagem pelo filtro, os valores de concentração de Na e K obtidos apresentaram-se bastante instáveis, não sendo possível obter um ajuste matemático que explicasse o comportamento dessas variáveis, apresentando-se apenas as médias das concentrações relativas (Figuras 13 e 14). De acordo com o que está apresentado nessas figuras, a remoção média de sódio foi de 38% ($Na/Na_0 = 0,62$) e no caso do potássio, praticamente não houve remoção ($K/K_0 \approx 1$). No entanto, observando a Figura 14 e Tabela 3, nota-se que o primeiro volume de poros apresentou concentração efluente de K maior que a afluente, tal como ocorrido e explicado para as variáveis DBO, DQO e P_T . A partir do segundo volume de poros é que o efluente torna-se menor que o afluente. Se o primeiro volume de poros for excluído, a remoção média entre o segundo e sexto volume de poros passa a ser de 18% ($K/K_0 = 0,82$).

Remoções de 38 e 18% de Na e K, respectivamente, podem ser consideradas satisfatórias quando comparadas com os resultados obtidos por Lo Monaco et al. (2004), Lo Monaco et al. (2009); Lo Monaco et al. (2011a), os quais não obtiveram remoções desses elementos químicos, ao utilizarem, respectivamente, filtros de serragem de madeira, fibra de coco e bagaço de cana-de-açúcar no tratamento de águas residuárias da suinocultura. Esses autores atribuíram ao fato do sódio e o potássio não estarem associados ao material orgânico que, por sua vez, é retido com eficiência nos filtros. Em consequência, como o nitrogênio e o fósforo estão associados à matéria orgânica, esses elementos foram retidos com eficiência pelos materiais filtrantes. Resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho foram obtidos por Lo Monaco et al. (2011b), que obtiveram remoções de 30% nas concentrações de Na em filtros orgânicos constituídos por pergaminho de grãos de café, no tratamento de águas residuárias da lavagem e descascamento dos frutos do cafeeiro. Acredita-se que, tal como ocorrido com o N-total, as remoções de Na e K possam ser atribuídas à adsorção desses dois cátions pelo material filtrante, o qual possui predomínio de cargas negativas em sua superfície.

CONCLUSÕES

A coagulação/decantação do esgoto sanitário com adição de extrato de sementes de moringa preparado em $Ca(OH)_2$ proporcionou elevadas eficiências na remoção de atributos físicos tais como 73,6; 71,3; 76,8; 68,7; 50,2; 96,7 e 30,8% de turbidez, Sólidos Totais, Sólidos Totais Fixos, Sólidos Totais Voláteis, Sólidos Suspensos Totais, Sólidos Suspensos Fixos e Sólidos Suspensos Voláteis, além de alguns atributos químicos e bioquímicos, como 35,6; 84,7 e 64,8% de Demanda Bioquímica de Oxigênio,

Demanda Química de Oxigênio e Fósforo total;

Excetuando-se turbidez, Sólidos Suspensos Totais, Sólidos Suspensos Voláteis e Sódio, todas as variáveis tiveram suas concentrações aumentadas no primeiro volume de poros filtrado, em razão da grande quantidade de solutos disponibilizados pelo material filtrante;

Ao final de seis volumes de poros filtrados, o filtro orgânico possibilitou a remoção de 92,4; 13,8; 20,2; 59,2; 83,2% de turbidez, Sólidos Totais, Sólidos Totais Voláteis, Sólidos Suspensos Totais e Sólidos Suspensos Voláteis e 23,8; 26,2; 22,2; 26,3; 46,7; 17,5% de Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio, Fósforo Total, Nitrogênio Total, Sódio e Potássio;

O filtro orgânico não proporcionou a remoção dos Sólidos Totais Fixos e dos Sólidos Suspensos Fixos do afluente nele aplicado;

Em relação o esgoto sanitário bruto, os tratamentos por coagulação/decantação seguidos de filtração proporcionaram remoções de 98,0; 75,3; 75,8; 75,0; 79,7; 59,0 e 88,3% de turbidez, Sólidos Totais, Sólidos Totais Fixos, Sólidos Totais Voláteis, Sólidos Suspensos Totais, Sólidos Suspensos Fixos e Sólidos Suspensos Voláteis e 51,2; 88,7; 72,6; 33,5 e 38,5% de Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio, Fósforo total, Nitrogênio total e Sódio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABDULSALAM, S. et al. Water clarification using *Moringa oleifera* seed coagulant: Maiduguri raw water as a case study. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 5, n. 1, p. 302-306, 2007.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF - WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21. ed. **Washington**: APHA/AWWA/WEF, 2005. 1268 p.
- BHATIA, S.; OTHMAN, Z.; AHMAD, A. L. Pre-treatment of palm oil mill effluent (POME) using *Moringa oleifera* seeds as natural coagulant. **Journal of Hazardous Materials**, v. 145, n. 1, p. 120-126, 2007.
- BHUPTAWAT, H.; FOLKARD, G. K.; CHAUDHARI, S. Innovative physico-chemical treatment of wastewater in incorporating *Moringa oleifera* seed coagulant. **Journal of Hazardous Materials**, v. 142,

n.1-2, p. 477-482, 2007.

BRANDÃO, V. S. et al. Retenção de poluentes em filtros orgânicos operando com águas residuárias da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 329-334, 2003.

BRASIL. Resolução nº 430, de 13 maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Brasília, 2011. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 15 mar. 2012.

GHEBREMICHAEL, K. A. et al. A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. **Water Research**, v. 39, n.1, p. 2338-2344, 2005.

HEREDIA, J. B.; MARTÍN, J. S. Removal of sodium lauryl sulphate by coagulation/flocculation with *Moringa oleifera* seed extract. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, n. 2-3, p. 713-719, 2009.

HEREDIA, J. B.; MARTÍN, J. S.; REGALADO, A. D. Removal of carmine indigo dye with *Moringa oleifera* seed extract. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 14, p. 6512-6520, 2009.

LO MONACO, P. A. V.; MATOS, A. T.; BRANDÃO, V. S. Influência da granulometria dos sólidos triturados de sabugo de milho e bagaço de cana-de-açúcar como materiais filtrantes no tratamento de águas residuárias da suinocultura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, p. 975-985, 2011a.

LO MONACO, P. A. V. et al. Desempenho de filtros constituídos por pergaminho de grãos de café (*Coffea* sp.) no tratamento de águas residuárias. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 120-127, 2011b.

LO MONACO, P. A. V. et al. Efeito da adição de diferentes substâncias químicas no extrato de sementes de moringa utilizado como coagulante no tratamento de esgoto sanitário. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 5, p. 1038-1048, 2013.

LO MONACO, P. A. et al. Influência da granulometria da serragem de madeira como material filtrante no tratamento de águas residuárias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 116-119, 2004.

LO MONACO, P. A. V. et al. Utilização de extrato de sementes de moringa como agente coagulante no tratamento de água para abastecimento e águas resi-

duárias. **Ambi-água**, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 222-231, 2010.

LO MONACO, P. A. V. et al. Desempenho de filtros constituídos por fibras de coco no tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 17, n. 6, p. 473-480, 2009.

MAGALHÃES, M. A. et al. Influência da compressão no desempenho de filtros orgânicos para tratamento de águas residuárias da suinocultura. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, n. 1, p. 26-32, 2005.

MAGALHÃES, M. A. et al. Operação de filtros orgânicos utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 472-478, 2006.

MARCUTI, A. L.; FERREIRA FILHO, S. S.; PIVELLI, R. P. Otimização de processos físico-químicos na remoção de fósforo de esgotos sanitários por processos de precipitação química com cloreto férrico. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, p. 395-404, 2008.

MATOS, A.T. **Poluição ambiental: impactos no meio físico**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2010. 260 p.

MATOS, A. T.; MAGALHÃES, M. A.; FUKUNAGA, D. Remoção de sólidos em suspensão na água residuária da despulpa de frutos do cafeeiro em filtros constituídos por pergaminho de grãos de café submetido a compressões. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 610-616, 2006.

MATOS, A. T.; MAGALHÃES, M. A.; SARMENTO, A. P. Perda de carga em filtros orgânicos utilizados no tratamento de água residuária de suinocultura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 527-537, 2010.

OKUDA, T. et al. Coagulation mechanism of salt solution-extracted active component in moringa oleifera seeds. **Water Research**, v. 35, n. 03, p. 830-834, 2001.

PRITCHARD, M. et al. A comparison between *Moringa oleifera* and chemical coagulants in the purification of drinking water – Alternative sustainable solution for developing countries. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 35, n. 13-14, p. 798-805, 2010.

SILVA, M. E. R.; AQUINO, M. D.; SANTOS, A. B. Pós-tratamento de efluentes provenientes de reatores anaeróbios tratando esgotos sanitários por coagulantes naturais e não-naturais. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 28, n. 2, p. 178-190, 2007.