

II-607 - AVALIAÇÃO DO EFEITO DA RECIRCULAÇÃO NO TRATAMENTO DE LODO DE FOSSAS SÉPTICAS EM SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE ESCOAMENTO VERTICAL EM ESCALA REAL E PILOTO

Cynthia Franco Andrade⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Fumec. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Marcos von Sperling

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestre em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutor em Engenharia Ambiental pelo Imperial College London. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Luisa Fernanda Calderón Vallejo

Engenheira Sanitária pela Universidad del Valle (Colômbia). Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidad del Valle e pelo Unesco-IHE

Elias Sete Manjate

Engenheiro Florestal pela Universidade Eduardo Mondlane (UEM), Maputo - Moçambique. Mestre em Ciências Florestais e Ambientais pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Endereço⁽¹⁾: Avenida Mário Martins de Freitas, 590, 102 - Guarapiranga – Ponte Nova - MG - CEP: 35430-600 - Brasil - Tel: (31) 9789-0154 - e-mail: cynfranco@gmail.com

RESUMO

A pesquisa consistiu na avaliação do tratamento de lodo de fossas sépticas em Sistema Alagado Construído (SAC) de escoamento vertical, por meio de uma unidade em escala real e duas colunas em escala piloto, no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento UFMG/Copasa (Belo Horizonte, MG). As unidades reais foram construídas conforme o sistema francês de SAC e operam desde 2009 no tratamento de esgoto. Em setembro de 2013, um dos leitos, com área de 29,1 m², 0,7 m de altura do meio suporte e plantado com capim tifton-85 (*Cynodon dactylon Pers*), começou a receber a aplicação de lodos de caminhões limpa-fossa uma vez por semana. O restante da semana foi utilizado como período de repouso para a estabilização e desaguamento do lodo acumulado. O líquido percolado foi recirculado em outros dois leitos. As colunas piloto foram de PVC, diâmetro de 145 mm, com a mesma planta e meio suporte da unidade real, e permitiram a investigação do efeito da dupla recirculação do líquido percolado. Os parâmetros DQO, ST e NTK foram monitorados no lodo bruto, líquidos percolados e recirculados. Foi realizada também a análise estatística dos resultados. A aplicação do lodo bruto teve uma taxa de aplicação hidráulica (TAH) de 13,1 m³/m².ano e de sólidos (TAS) de 81 kgST/m².ano. O lodo bruto apresentou, para todos os parâmetros, concentrações inferiores às reportadas na literatura e foi concluído que o sistema melhorou a qualidade do líquido percolado em termos de matéria carbonácea (eficiência mediana de remoção de 46% de ST e 72% de DQO) e nitrogenada (eficiência mediana de remoção de 59% de NTK). Quanto às estratégias de recirculação e dupla recirculação adotadas nos sistemas, estas não resultaram em melhores condições do líquido percolado.

PALAVRAS-CHAVE: Wetlands construídos, sistema alagado construído, fossa séptica, recirculação, lodo.

INTRODUÇÃO

A coleta e o tratamento de esgotos, ainda hoje, é um desafio no mundo. No Brasil, o índice de atendimento da população total com coleta de esgotos é de apenas 46,2% (SNIS, 2012) e os sistemas individuais de tratamento, como as fossas sépticas, têm sido uma alternativa para destinar adequadamente os efluentes domésticos. No Brasil, 20,7% (IBGE, 2008) da população utilizam as fossas sépticas. É importante ressaltar que esse número refere-se somente às fossas sépticas e desconsidera os sistemas como fossas absorventes e negras, que também ocorrem no Brasil e em outros países. Elas se destacam devido a algumas características vantajosas, como o tratamento *in loco*, o custo relativamente baixo e a simplicidade operacional. Porém, a

manutenção necessita ser periódica, pois o lodo acumulado no sistema deve ser removido (PHILIPPI, 1993). A limpeza das fossas ocorre por meio dos serviços de empresas conhecidas como “desentupidoras” ou “caminhões limpa-fossa”. Algumas dessas empresas não são regularizadas ambientalmente e muitas vezes não fornecem uma destinação adequada do material coletado, despejando-o, por exemplo, em corpos d’água.

O lodo retirado na limpeza das fossas deve ser tratado e disposto corretamente e para isso os caminhões limpa-fossa têm encaminhado o lodo às estações de tratamento de esgoto (ETE), quando estas existem e podem receber o material. Tal lodo apresenta elevadas concentrações de matéria orgânica, das formas do nitrogênio e de sólidos, que não são típicas de lodo de ETE nem de esgotos sanitários (ANDREOLI, 2009). Além disso, os caminhões limpa-fossa nem sempre recolhem o lodo somente de fossas sépticas, abrangendo, por exemplo, resíduos de caixas de gordura ou banheiros químicos, conduzindo a um material ainda mais heterogêneo e de difícil caracterização. Apesar disso, visando uniformizar a linguagem, todo o material recolhido pelos caminhões limpa-fossa será mencionado no texto como lodo de fossas sépticas.

Para Bassan *et al.* (2013), a gestão do lodo de fossas sépticas é um problema desafiador em países de baixa renda, onde grande parte da população urbana depende de sistemas de tratamento locais. Em alguns países da Europa, Ásia e África (UGGETTI *et al.*, 2010), uma alternativa tecnológica para o lodo anaeróbio, incluindo o de fossas sépticas, tem sido o tratamento através de sistemas alagados construídos (SAC), também conhecidos como *wetlands* construídos ou leitos de secagem plantados. A variante de SAC mais adequada para o tratamento de lodo de fossa é a de escoamento vertical. No entanto, o percolado, após uma única passagem pelo leito, pode conter ainda elevadas concentrações dos principais constituintes. Portanto, uma possibilidade de melhoria de sua qualidade seria uma recirculação, para novo escoamento vertical.

A recirculação do líquido percolado no sistema, principalmente no que se refere ao tratamento do lodo de fossas sépticas, é um tema ainda pouco pesquisado. Foladori *et al.* (2013) afirmam que, apesar do crescente interesse dos SAC com recirculação e/ou aeração, este tema ainda não foi amplamente investigado, sendo a maioria das aplicações em escala de laboratório. Gagnon *et al.* (2012) informam que a recirculação em SAC tratando lodo pode ser uma estratégia para a redução da concentração elevada de nitrogênio amoniacal. Prost-Boucle e Molle (2012) utilizaram a recirculação no tratamento de esgoto em SAC e afirmam que essa concepção pode melhorar a eficiência da nitrificação, reforçando, simultaneamente, a remoção de matéria orgânica e sólidos.

Diante da falta de critérios de projeto padronizados (KOOTTATEP, 2002; SUNTTI *et al.* 2011) para a tecnologia dos SAC tratando lodo, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, em escala real e piloto, o efeito na eficiência de remoção de matéria orgânica e nitrogenada e sólidos, após a recirculação do líquido percolado em uma segunda unidade de SAC.

MATERIAIS E MÉTODOS

O SAC em escala real foi construído em 2007, com características típicas do primeiro estágio de um sistema francês de escoamento vertical (três unidades em paralelo, com alimentação em pulso, alternada entre os leitos), e o projeto foi inicialmente concebido para o tratamento apenas de esgotos sanitários. Em 2013 o sistema foi alterado, consistindo em três filtros verticais, sendo que apenas um leito recebia a aplicação de lodo do caminhão limpa-fossa e foi identificado como a Unidade de Lodo (UL). Os outros dois eram alimentados por esgoto sanitário (equivalente populacional de 100 habitantes), operando em paralelo e alternadamente, com períodos de alimentação e repouso, de uma semana cada. Estes dois leitos recebiam o líquido percolado da UL no período de repouso do ciclo operacional, sendo denominados como Unidade de Recirculado 1 e 2 (UR1 e UR2). Cada leito possui 3,1 m de largura, 9,4 m de comprimento e 1,0 m de parede lateral, preenchidos com 0,70 m de meio suporte, sendo 0,40 m de brita 0 (2,4 a 12,5 mm) na camada superficial, 0,15 m de brita 1 (4,8 a 25 mm) na camada intermediária e 0,15 m de brita 3 (19 a 50 mm) na camada inferior, e plantado com capim tifton-85 (*Cynodon dactylon Pers*). Neste caso, a área de cada leito é 29,1 m² e a área total do sistema corresponde a 87,4 m².

Vale ressaltar que a granulometria utilizada foi concebida para o tratamento de esgotos, sem se antever, na época, a utilização para o tratamento de lodo. Para a presente pesquisa, foi mantida a granulometria original segundo o sistema francês para tratamento de esgotos, sem modificações para o recebimento do lodo. Além

disso, a aplicação de esgoto sanitário nas unidades de recirculação estava inserida no contexto de outro projeto do Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos e não foi objeto de pesquisa do presente trabalho.

A operação do sistema com lodo teve início em 27 de setembro de 2013, sendo aplicado uma vez por semana o lodo de um caminhão limpa-fossa, de empresas distintas, com volume de aproximadamente 8,0 m³. A Figura 1 apresenta o esquema do sistema. A taxa de aplicação de sólidos (TAS) não era controlada a cada aplicação, como ocorre em outros estudos da literatura, sendo determinada após a análise da concentração de sólidos totais em laboratório. No que se refere à taxa de aplicação hidráulica (TAH), os leitos recebiam todo o volume transportado por cada caminhão, também implicando em distintas taxas a cada batelada. Tal estratégia foi adotada, pois em uma localidade real, possivelmente, essas seriam as condições de operação, sem condições de exercer controle absoluto sobre os volumes e cargas aplicados.

Além do sistema de tratamento em escala real descrito, foram realizados testes em escala piloto para avaliar o efeito da dupla recirculação do líquido percolado. O SAC piloto consiste em duas colunas em PVC com um diâmetro interno de 145 mm e área de 0,0165 m², com a mesma planta (capim tifton-85) e meio suporte (brita 0, brita 1 e brita 3) do sistema real, totalizando os mesmos 1,00 m de parede lateral (0,70 m de meio suporte e 0,30 m de borda livre). No fundo de cada coluna, há um cap perfurado para sustentar o meio suporte e permitir a saída do percolado. Na Unidade Piloto 1 (UP1) é aplicado o mesmo lodo bruto (LB) utilizado na escala real, com volume proporcional à área da unidade (mesma TAH da unidade em escala real), sendo aplicados, por exemplo, 4,5 L quando o caminhão limpa-fossa apresenta volume de 8,0 m³. O líquido percolado da UP1 é recirculado na Unidade Piloto 2 (UP2) e, posteriormente, o líquido recirculado 1 (drenado da UP2) é recirculado novamente na UP2, gerando o líquido recirculado 2, conforme a Figura 2. A operação do sistema piloto teve início em 30 de abril de 2014, sendo aplicado uma vez por semana o mesmo lodo aplicado no sistema real, proveniente de caminhão limpa-fossa.

Vale dizer que a UP1 era a unidade equivalente a UL do sistema em escala real, onde o efluente era o líquido percolado. Já a UP2, acrescida de uma segunda recirculação, era a unidade equivalente a UR da escala real, sendo o efluente nomeado de líquido recirculado. A Figura 3 apresenta a vista geral do sistema, com a identificação de suas unidades e componentes.

Para verificação do desempenho das unidades reais e pilotos foram avaliados, semanalmente, os parâmetros Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) e Sólidos Totais (ST), de acordo com as orientações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA/AWWA/WEF, 2012). Posteriormente, após 405 dias de operação (27/09/2013 a 05/11/2014), para comparações e análise da significância dos dados obtidos, foi aplicado o teste não paramétrico *U de Mann-Whitney*, com nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), com o auxílio do programa *Statistica 8.0*.

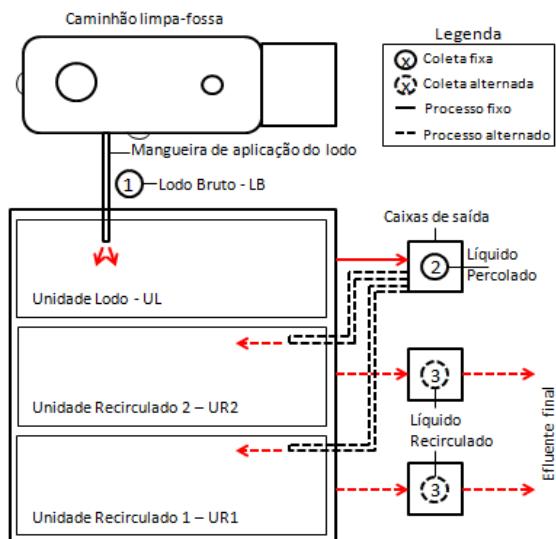


Figura 1: Esquema do sistema alagado construído para tratamento de lodo de fossas

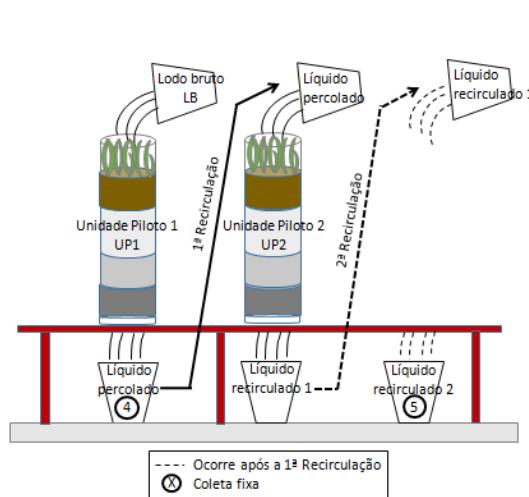


Figura 2: Esquema do sistema alagado construído piloto para avaliação da dupla recirculação



UL: unidade que recebe o lodo bruto
UR1 e UR2: unidades que recebem o líquido percolado na recirculação
UP1: unidade piloto que recebe o lodo bruto
UP2: unidade piloto que recebe o líquido percolado piloto na dupla recirculação

A: Mangueira de recirculação
B: saída de amostragem do líquido percolado
C: saídas de amostragem dos líquidos recirculados

Figura 3: Vista geral do SAC

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O lodo bruto amostrado na saída das mangueiras limpa-fossa apresentou elevada variação durante o monitoramento, o que era esperado, já que a proveniência dos caminhões era distinta em cada aplicação. Foram recebidos lodos de diferentes instalações domésticas, como casas, sítios, condomínios, pequenos comércios e canteiros de obras. A localização dessas instalações também foi variada, havendo ocorrências nos municípios de Belo Horizonte, Nova Lima, Santa Luzia, Lagoa Santa, Vespasiano, Betim, Contagem, Sarzedo, Baldim, Ribeirão das Neves, Esmeraldas e São Joaquim de Bicas. Heinss *et al.* (1999), em estudo de caracterização de fossas sépticas e banheiros públicos, perceberam que as características do lodo podem variar devido a diversos fatores de influência, como: tempo de armazenamento, mistura com óleos e graxas ou resíduo orgânico de cozinha, temperatura, desempenho da fossa séptica e tecnologia de esvaziamento.

Acrescenta-se também sobre a qualidade do lodo bruto, a presença de resíduos na maioria das aplicações, principalmente plásticos. Tilley *et al.* (2014) apontam que a presença de resíduos é um dificultador da gestão adequada do lodo de fossas sépticas e Strande *et al.* (2014) afirmam que os resíduos podem causar problemas na coleta e transporte do lodo, resultando em bombas e tubulações entupidas, necessidade de maior capacidade de armazenamento, além de poder afetar o desempenho do tratamento.

Assim como a origem, o volume de lodo aplicado no SAC semanalmente variou, de 3,5 a 12 m³, conforme capacidade do caminhão e o quanto este estava cheio, sendo que predominou o volume de 8 m³. A TAH média resultante foi de 13,1 m³/m².ano.

Da mesma forma, a TAS também variou bastante ao longo do monitoramento, resultando em uma TAS média de 81 kgST/m².ano, inferior ao relatado na literatura em estudos semelhantes, como Suntti *et al.* (2011), que trabalharam com lodo de fossa séptica com taxas de 125 a 250 kgST/m².ano. Para Koottatep (2002) e Koné e Strauss (2004), a taxa sugerida para tratamento de lodo de fossa séptica em regiões tropicais é de 125 a 250 kgST/m².ano e ≤ 250 kgST/m².ano, respectivamente. Já Kengne *et al.* (2011), em estudo realizado com SAC tratando lodo de fossa séptica no Camarões, encontrou bons resultados com uma TAS de 100 kgST/m².ano. Com isso, verifica-se que a taxa do sistema em avaliação encontra-se inferior às citadas, podendo influenciar na qualidade do líquido percolado e recirculado, bem como no desaguamento do lodo acumulado.

Demanda química de oxigênio

Analizando a DQO, observa-se pela Tabela 1 e Figura 4 que, de maneira geral, as concentrações do lodo são elevadas quando comparadas às de esgoto doméstico, que são em torno de 600 mg/L (VON SPERLING, 2005). Tanto o lodo bruto, quanto os líquidos percolados e recirculados apresentaram elevada variação durante o monitoramento, já que a proveniência dos caminhões limpa-fossa era diferente em cada aplicação. Bassan *et al.* (2013), que também encontrou grande variabilidade nas amostras de lodo de caminhão limpa-fossa, comentam que essa variação é devida a fatores como a duração de armazenamento, clima, tipo do sistema e a capacidade de esvaziamento do caminhão.

Tabela 1: Síntese da estatística descritiva das concentrações de DQO

Medidas	DQO (mg/L)				
	LB	UL	UR	UP1	UP2
Núm. dados	43	43	30	19	16
Mínimo	174	73	137	297	204
Máximo	31400	8460	1885	3412	1977
Média	5838	956	613	1415	992
Mediana	2937	515	490	1146	856
Desvio padrão	7284	1316	397	913	558

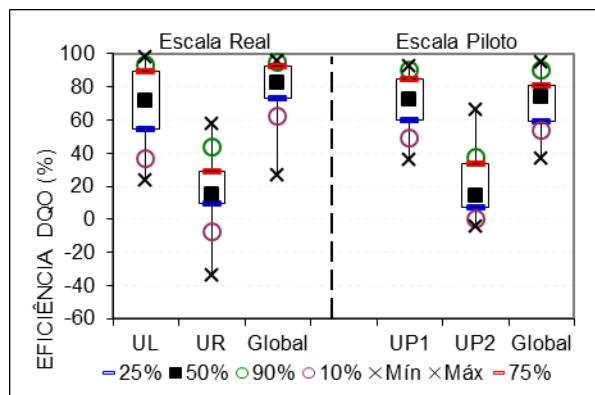


Figura 4: Box-plot de eficiência de remoção de DQO

Ao avaliar o líquido recirculado da UR, nota-se que não houve um incremento expressivo na melhoria da qualidade do efluente. A concentração mediana de DQO de 490 mg/L, apesar de inferior, é muito próxima à encontrada no líquido percolado na UL, de 515 mg/L. Estatisticamente, para um nível de significância de 5%, de fato não houve diferenças significativas entre a UL e UR. A eficiência de remoção global do sistema real, após a passagem do líquido percolado da UL na UR, gerando o líquido recirculado, foi de 82% para a DQO, incrementando em 10 pontos percentuais a qualidade do efluente. Os testes estatísticos ($\alpha = 0,05$) indicam que houve diferença significativa entre a UL e UR para a eficiência de remoção de DQO.

Prost-Boucle e Molle (2012), em estudo na França com SAC vertical tratando esgoto doméstico, informam que para cargas elevadas de DQO (220 kgDQO/m².ano) a recirculação apresenta limitações no desempenho, sendo apontada até uma pequena diminuição na eficiência de remoção. Na presente pesquisa, a carga de DQO não foi elevada, sendo em média de 71 kgDQO/m².ano.

Diferentemente, Lavrora e Koumanova (2010), em estudo realizado na Bulgária para tratamento de lixiviado de aterro sanitário em SAC vertical, notaram que, quanto maior o número de recirculações do efluente, melhor era a eficiência de remoção de DBO e DQO do sistema. Foladori *et al.* (2013), em estudo de avaliação de SAC vertical tratando esgoto na Itália, também encontraram que a recirculação permitiu uma maior eficiência de remoção de DQO.

Na escala piloto, o líquido da dupla recirculação apresentou concentrações de DQO de 856 mg/L e eficiência de remoção de 74%. Avaliando os testes estatísticos, a 5% de significância, entre a UP1 e UP2, verifica-se que a dupla recirculação não resultou em melhorias no tratamento, nem em termos de concentração, nem de eficiência. Quando analisada a comparação entre a UR do sistema real e a UP2, nota-se que houve diferenças significativas ($\alpha = 0,05$), sendo que a UR apresenta concentração menor.

Sólidos totais

Quando observadas as concentrações e eficiências de remoção de ST (Tabela 2 e Figura 5), nota-se também que, tanto o lodo bruto, quanto os líquidos percolados e recirculados, apresentaram elevada variação durante o monitoramento. Além disso, os valores encontrados foram inferiores ao relatado na literatura, sendo que uma possibilidade para a baixa eficiência do sistema para remoção de ST pode ser a granulometria do meio filtrante. De fato, Kuffour *et al.* (2009), em pesquisa sobre tratamento de lodo de fossa séptica e de banheiro público, utilizando três filtros pilotos, sem planta, com diferentes granulometrias de areia, verificaram que o leito com areia de menor granulometria (0,1 a 0,5 mm) produziu um efluente duas vezes menos concentrado que aquele com granulometria maior (1 a 1,5 mm). Na presente pesquisa, a granulometria da superfície é ainda maior (2,4 a 12,5 mm), pois é utilizada brita e não areia. Vicent *et al.* (2011) comentam ainda que a camada de substrato deve garantir uma boa filtragem dos sólidos. Deve-se lembrar que o presente sistema representa a utilização direta do sistema francês para tratamento de esgotos, sem adaptações para o recebimento de lodo, mantendo, portanto, a granulometria do sistema original.

Além disso, em alguns estudos que relatam boas eficiências de remoção de ST, como os realizados por Koottatep *et al.* (2004) e Suntti *et al.* (2011), os SAC eram alimentados e a saída do sistema era mantida fechada, aumentando o tempo de detenção hidráulica, o que não ocorre na presente pesquisa. No caso de Koottatep *et al.* (2004), o líquido era retido por uma semana, após o qual era descarregado, para que o leito pudesse receber nova aplicação de lodo.

Tabela 2: Síntese da estatística descritiva das concentrações de ST

Medidas	ST (mg/L)				
	LB	UL	UR	UP1	UP2
Núm. dados	43	42	30	21	17
Mínimo	583	500	488	505	582
Máximo	61391	4823	2752	3691	2512
Média	6373	1428	1380	1557	1197
Mediana	2349	1159	1258	1397	1111
Desvio padrão	10358	914	646	822	514

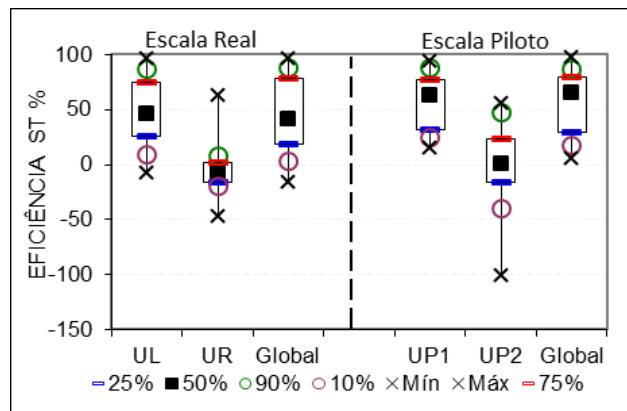


Figura 5: Box-plot de eficiência de remoção de ST

No que se refere ao efeito da recirculação, estatisticamente, para um nível de significância de 5%, não houve diferenças entre os líquidos percolados (UL e UP1) e recirculados (UR e UP2), nem no que se refere à concentração e nem à eficiência de remoção de sólidos totais do sistema real e piloto.

Calderón-Vallejo *et al.* (2014), em estudo anterior à presente pesquisa, com seis SAC pilotos tratando lodo de fossas sépticas e com as mesmas dimensões, meio suporte e plantas da presente pesquisa, mudando somente a escala do sistema, encontraram que a realização da recirculação não foi relevante em termos de eficiência de remoção de sólidos, a um nível de confiança de 95%. Porém ressalta-se que nesse estudo o período total de operação foi apenas de 4 meses.

Diferentemente, Prost-Boucle e Molle (2012), em estudo realizado em SAC tratando esgoto doméstico na França, informaram que obtiveram melhores resultados na eficiência de remoção de sólidos em suspensão por meio da recirculação do efluente, alcançando uma concentração de 16 mg/L. Apesar de terem obtido eficiências globais superiores a 90%, os autores observaram que estas altas eficiências ocorriam quando os afluentes brutos eram fortemente concentrados. Na presente pesquisa, como já mencionando, a concentração mediana de ST no lodo bruto, bem como a taxa de aplicação de sólidos, foi baixa, se comparada com a literatura, podendo ter influenciado no tratamento.

Nitrogênio total Kjeldahl

Assim como para os outros parâmetros já analisados, observa-se pela Tabela 3 e Figura 6 que, tanto o lodo bruto, quanto os líquidos percolados e recirculados apresentaram grande variação do NTK durante o monitoramento, sendo que para a concentração os valores foram semelhantes ao relatado na literatura, mas com eficiências de remoção menores.

Tabela 3: Síntese da estatística descritiva das concentrações de NTK

Medidas	NTK (mg/L)				
	LB	UL	UR	UP1	UP2
Núm. dados	35	35	29	21	17
Mínimo	5	4	4	7	5
Máximo	564	91	82	119	86
Média	109	38	29	48	30
Mediana	88	33	24	45	30
Desvio padrão	103	24	21	33	23

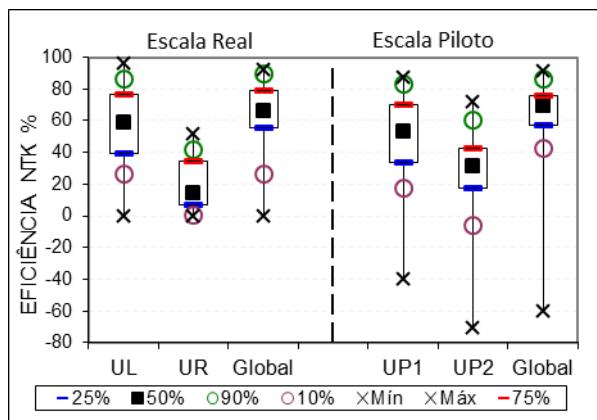


Figura 6: Box-plot de eficiência de remoção de NTK

Analizando estatisticamente ($\alpha = 0,05$), a concentração de NTK diminuiu, significativamente, do lodo bruto para o líquido percolado, sugerindo a ocorrência do processo de nitrificação, em que o amônio é oxidado a nitrito e nitrato. Verificando a etapa de recirculação do sistema, nota-se que não houve diferença entre UL e UR, o que é confirmado após a aplicação de testes estatísticos a um nível de significância de 5%.

Por outro lado, Cui *et al.* (2012), em uma variante do SAC tratando esgoto de fossa séptica na China, concluíram que a eficiência de remoção de amônia e nitrogênio total aumentou com a frequência de recirculação, mas os autores apontam que, a depender de outros fatores, como a taxa de aplicação hidráulica, que ocasionou para uma e duas vezes de recirculação um aumento de apenas 1-2% na eficiência de remoção de nitrogênio total. Connolly *et al.* (2003), em estudo de tratamento de lixiviado de aterro sanitário em SAC, demonstraram que, em geral, um maior número de recirculações do esgoto possibilitava maior eficiência de remoção de N-NH_4^+ . Lavrora e Koumanova (2010), em estudo realizado na Bulgária também para tratamento de lixiviado de aterro sanitário em SAC, notaram que quanto maior o número de recirculações do esgoto, melhor era a eficiência de remoção de N-NH_4^+ do sistema.

Foladori *et al.* (2013), em estudo de avaliação de SAC tratando esgoto na Itália, encontrou que a recirculação permitiu uma redução progressiva de N-NH_4^+ , e correspondentemente aumento de N-NO_3^- , obtendo um esgoto com concentração de N-NH_4^+ de 16,2 mg/L e eficiência de remoção de 72%.

Nos SAC pilotos, estatisticamente ($\alpha = 0,05$) não houve diferença entre as unidades, indicando que a dupla recirculação não melhorou a qualidade do esgoto de forma significativa. Comparadas com as unidades reais, também não foram encontradas diferenças no desempenho dos sistemas. Tunçsiper (2009) testou diferentes frequências de recirculação em um SAC híbrido tratando esgoto doméstico e verificou que uma única recirculação apresentou melhores resultados do que a dupla recirculação na remoção de nitrogênio.

CONCLUSÕES

A presente pesquisa tinha como objetivo avaliar o efeito da recirculação no tratamento de lodo de fossas sépticas em sistemas alagados construídos de escoamento vertical e foi possível concluir que o sistema, como um todo, melhorou a qualidade do líquido percolado em termos de matéria carbonácea (eficiência de remoção de ST na UL de 46% e Global de 42% e de DQO na UL de 72% e Global de 82%, no sistema real) e nitrogenada (eficiência de remoção de NTK na UL de 59% e Global de 66%, no sistema real), mas apresentou, de maneira geral, concentrações maiores e eficiências de remoção menores do que as reportadas na literatura, o que pode estar relacionado com diversas características de concepção e projeto dos SAC.

A etapa de recirculação adotada no sistema real não acarretou em melhores condições do líquido percolado, ao contrário do que se esperava, principalmente para nitrogênio, não havendo diferenças entre o líquido recirculado e o percolado no sistema. Da mesma forma, a dupla recirculação testada nos SAC pilotos também não se mostrou uma estratégia interessante para a melhoria da qualidade do esgoto final. Deve-se destacar que a recirculação foi praticada de forma concentrada, em pulso único, ao invés de distribuída ao longo do dia, o que pode explicar as eficiências menores do que as reportadas na literatura.

Mesmo com a grande variação nas taxas de aplicação hidráulica e de sólidos, o SAC manteve seu desempenho, indicando que os leitos e as plantas foram, relativamente, resistentes aos “choques” de cargas, o que mostra que é um sistema robusto para condições operacionais que podem ocorrer na realidade de pequenas comunidades.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, Capes, Fapemig, Funasa, Copasa e Fundação Bill e Melinda Gates (projeto “Saneamento para o pobre urbano”, coordenado pelo Unesco-IHE).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANDREOLI, C. V. Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final. Rio de Janeiro: ABES, 2009.
2. APHA/AWWA/WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22. ed.. Washington: APHA, 2012.
3. BASSAN, M.; TCHONDA, T.; YIOUGO, L.; ZOELLIG, H.; MAHAMANE, I.; MBÉGUÉRÉ, M.; STRANDE, L. Characterization of faecal sludge during dry and rainy seasons in Ouagadougou, Burkina Faso. In: 36th WEDC International Conference, Nakuru, Kenya. 2013.
4. CALDERÓN-VALLEJO, L. F.; ANDRADE, C. F.; MANJATE, E. S.; MADERA-PARRA, C. A.; VON SPERLING, M. Performance of a system with full and pilot-scale vertical flow constructed wetland units treating septic tank sludge in Brazil. In: IWA, 14th Conference on wetland systems for water pollution control. Shanghai, China. p.338. 2014.
5. CONNOLLY, R., ZHAO, Y., SUN, G., ALLEN, A. Removal of ammoniacal-nitrogen from an artificial landfill leachate in downflow reed beds. Process Biochem. n. 39. 2003.
6. CUI, Y.; SUN, T.; ZHAO, L.; JIANG, T.; ZHANG, L. Performance of wastewater sludge ecological stabilization. Journal of Environmental Sciences, n. 20. 2008.
7. FOLADORI, P.; RUABEN, J.; ORTIGARA, A. R. C. Recirculation or artificial aeration in vertical flow constructed wetlands: A comparative study for treating high load wastewater. Bioresource Technology, 149, 2013.
8. GAGNON, V. Effect of plant species on water quality at the outlet of a sludge treatment wetland. Water Research. v. 46. 2012.
9. HEINSS, U.; LARMIE, S.A.; STRAUSS, M. Characteristics of faecal sludges and their solids-liquid separation. EAWAG/SANDEC, 1999.
10. IBGE. Temas e subtemas. Famílias e domicílios. Saneamento básico. Esgotamento sanitário. 2008. Disponível em: <<http://www.seriesestatisticas.ibge.gov.br/>>. Acesso em: nov. 2013.
11. KENGNE, I. M.; KENGNE, E. S.; AKOA, A.; BEMMO, N.; DODANE, P. H.; KONE, D. Vertical-flow constructed wetlands as an emerging solution for faecal sludge dewatering in developing countries. Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development 1. 2011.
12. KONÉ, D.; STRAUSS, M. Low-cost Options for Treating Faecal Sludges (FS) in Developing Countries – Challenges and Performance. In: International IWA Specialist Group Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control and to the 6th International IWA Specialist Group Conference on Waste Stabilisation Ponds, 9th. Avignon, France, 2004.
13. KOOTTATEP, T.; SURINKUL, N.; POLPRASERT, C.; KAMAL, A. S. M.; KONÉ, D.; MONTANGERO, A.; HEINSS, U.; STRAUSS, M. Treatment of septage in constructed wetlands in tropical climate - lessons learnt after seven years of operation. Wat. Sci. Tech. v. 51, 2004.
14. KUFFOUR, A. R.; AWUAH, E.; ANYEMEDU, F. O. K.; STRAUSS, M.; KONE, D.; COFIE, E. Effect of using different particle sizes of sand as filter media for dewatering faecal sludge. Desalination, 248, 2009.
15. LAVRORA, S.; KOUMANNOVA, B. Influence of recirculation in a lab-scale vertical flow constructed wetland on the treatment efficiency of landfill leachate. Bioresource Technology, 101, 2010.
16. PHILIPPI, L. S. Funcionamento de fossas sépticas em condições reais: volume e acumulação de lodo. In: ABES, 17º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1993. Natal. p.633-642.
17. PROST-BOUCLE, S.; MOLLE, P. Recirculation on a single stage of vertical flow constructed wetland: Treatment limits and operation modes. Ecological Engineering. v. 43, 2012.
18. SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2010. MCIDADES. Brasília: 448 p. 2012.
19. STRANDE, L.; RONTELATAP, M.; BRDJANOVIC, D. Faecal Sludge Management. Systems Approach for Implementation and Operation. IWA. p. 427. 2014.
20. SUNTTI, C.; MAGRI, M. E.; PHILIPPI, L. S. Filtros plantados com macrófitas de fluxo vertical aplicados na mineralização e desaguamento de lodo de tanque séptico. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 16, 2011.
21. TILLEY, E.; ULRICH, L.; LÜTHI, C.; REYMOND, P.; ZURBRÜGG, C. Compendium of Sanitation Systems and Technologies. EAWAG. 2ed. 2014.
22. TUNCSIPER, B. Nitrogen removal in a combined vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetland system. Desalination, 247, 2009.
23. UGGETTI, E.; FERRER, I.; LLORENS, E.; GARCIA, J. Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. Bioresource Technology, v. 101, n. 9, p. 2905-2912, 5// 2010.

24. VINCENT, J.; MOLLE, P.; WISNIEWSKI, C.; LIÉNARD, A. Sludge drying reed beds for septage treatment: Towards design and operation recommendations. *Bioresouce Technology*, 102, 2011.
25. VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos v.1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia sanitária e Ambiental – UFMG. 452p. 2005.