

Avaliação do desempenho de uma tecnologia apropriada para o saneamento rural

Assessment of an appropriate technology for rural sanitation

• **Data de entrada:**
31/03/2019

• **Data de aprovação:**
16/04/2019

Vitor Tonzar Chaves | Fábio Alves Tomaz | Ronan Cleber Contrera

DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.063>

Resumo

As características da zona rural requerem que sejam pensadas soluções apropriadas a este conceito, de modo que uma tecnologia mais barata e simples pode ser melhor do que outra mais *tecnológica*. Tal conceito é fundamental aos engenheiros que desejam trabalhar com saneamento rural. Neste trabalho, é apresentada uma tecnologia montada em escala real para tratar uma vazão de 360 L.dia⁻¹, que é composta por três estágios de tratamento: uma fossa-digestora, um decantador e um alagado construído de fluxo vertical. A eficiência global média de remoção de DQO do sistema foi de 89% ± 6%, e a de sólidos suspensos totais, de 92% ± 7%. O sistema mostrou-se resiliente e estável mesmo trabalhando com grandes cargas de DQO, e apresentou um efluente final com concentrações de coliformes termotolerantes aceitáveis para o reúso por irrigação por gotejamento em pomares, de acordo com os critérios de avaliação de risco à saúde estipulados pela WHO (2006).

Palavras-chave: Alagados construídos. Reúso agrícola. Saneamento rural. Tecnologia apropriada.

Abstract

The concept of appropriate technology proposes that the best solution for a given situation will depend on the characteristics of that context, so that a cheaper and simpler technology may be better than a high-tech one. Such a concept is fundamental to engineers who wish to work with rural sanitation. In this work, a technology designed to treat a daily flow of 360 L.dia⁻¹ is presented, which is composed of three stages of treatment: a digester pit, a decanter and a vertical flow constructed wetland. The overall COD removal efficiency of the system was 89% ± 6%, and that of total suspended solids, of 92% ± 7%. The system proved to be resilient and stable even when working with large COD loads and presented a final effluent with concentrations of thermotolerant coliforms acceptable for reuse by drip irrigation in orchards, according to the health risk assessment criteria stipulated by WHO (2006).

Keywords: Agricultural reuse. Appropriate technology. Constructed wetlands, rural sanitation.

Vitor Tonzar Chaves – Graduado em Engenharia Naval pela Escola Politécnica da USP. Mestre em Engenharia Hidráulica e Ambiental. Atuou como integrante do Núcleo de Agroecologia e Tecnologias Sociais do Escritório Piloto da EPUSP (Agroeco-EP). Idealizador da Sapiência Ambiental. Realiza projetos de tecnologias sustentáveis de tratamento de esgoto, aproveitamento de água de chuva, biodigestão, compostagem e educação ambiental desde 2014.

Fábio Alves Tomaz – Graduando em Engenharia Ambiental pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Iniciação científica em aplicação de esgoto tratado para produção de feijões. Integrante do Núcleo de Agroecologia e Tecnologias Sociais do Escritório Piloto da EPUSP.

Ronan Cleber Contrera – Graduado em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Mestre) e Doutor pelo Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC - USP. Ex-assessor do Secretário Municipal de Desenvolvimento Sustentável, Ciência e Tecnologia da Prefeitura de São Carlos-SP. Ex-chefe da Divisão de Gestão de Resíduos Sólidos da Secretaria Municipal de Serviços Públicos da Prefeitura de São Carlos-SP. Ex-gestor e analista de projetos de Saneamento para Sabesp. Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Chefe do Laboratório de Saneamento (Lucas Nogueira Garcez) e do Laboratório Analítico e Experimental em Resíduos Sólidos Industriais e Urbanos (LAERSIU). Atua no Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP.

***Endereço para correspondência:** Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (PHA), Escola Politécnica (EP), Universidade de São Paulo (USP), Avenida Prof. Almeida Prado, 83 trav. 2, Cidade Universitária, CEP: 05508-900, São Paulo, SP, Brazil. E-mail: vitor.chaves@usp.br.

1 INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB), Lei 11.445/2007, é um importante marco legal que institui, entre outras determinações, uma série de princípios norteadores para o setor: universalização, equidade, integralidade, intersectorialidade e controle social. Em síntese, tais princípios determinam que todos os brasileiros tenham acesso igualitário ao saneamento básico, sem barreiras de qualquer natureza e que, para que isso seja concretizado, grupos historicamente excluídos deverão ser priorizados pelas ações sanitárias.

Contudo, os baixos índices de atendimento dos serviços sanitários, sobretudo no que se refere à coleta e ao tratamento de esgoto, indicam que a universalização ainda está longe de se concretizar no Brasil. Muitos municípios não contam com infraestruturas para o tratamento de esgoto: dados apresentados pelo Atlas do Saneamento Básico (IBGE, 2011) mostram que apenas um terço dos municípios realizou tratamento de esgotos. Isso mostra que o problema do esgotamento sanitário não atinge apenas as grandes metrópoles, uma vez que 68,4% dos municípios brasileiros possuem até 20 mil habitantes (IBGE, 2016). Grande parte desses municípios sofre com a falta de sistemas de tratamento de esgoto, seja por motivos financeiros ou por carência de capacidade técnica em operá-los. O déficit de soluções tecnológicas para o esgotamento sanitário rural é enorme.

Como pode-se concluir a partir de uma análise histórica do saneamento, o paradigma tecnológico sanitário foi conformado a partir das demandas e necessidades dos centros urbanos que surgiram na Inglaterra ao longo do século XIX com o advento da Revolução Industrial, de modo que, tradicionalmente, os engenheiros foram formados de modo a pensar as soluções para esses grandes centros, deixando de lado os problemas sanitários da zona rural. A situação da zona rural brasileira foi historicamente marcada por um cenário de doenças, dentre as quais se destacavam a anci-

lostomíase, a doença de Chagas e a malária. A população rural ficou sempre à margem de qualquer tipo de política pública. Apenas a partir de 1918, com a criação da Liga Pró-Saneamento do Brasil, surgiram as primeiras políticas públicas voltadas para a população rural, como a implantação dos postos de profilaxia rural (REZENDE e HELLER, 2008). Contudo, a evolução do setor foi muito lenta, sendo a história do saneamento no Brasil pós-colonização caracterizada pela insuficiência de infraestruturas sanitárias. No segundo governo de Getúlio Vargas, em 1952, mais de 1500 municípios brasileiros, de um total de 1900, ainda não dispunham sequer de serviços de abastecimento de água (REZENDE e HELLER, 2008).

A PNSB (BRASIL, 2007), assim como a Resolução no 62/292 publicada pela Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) no ano de 2010, são importantes marcos que reconhecem o acesso à água potável e limpa e ao saneamento como direitos humanos essenciais para o pleno gozo da vida. Por outro lado, é certo que a mera enunciação de direitos não é capaz de torná-los realidade, e que, para realizá-los, é necessário que sejam criadas as bases materiais e cognitivas apropriadas para os fins desejados. A fim de estabelecer algumas dessas bases para transformar a realidade, foi criado, a partir da PNSB, o Plano Nacional de Saneamento Básico (PlanSab), o qual prevê em suas macrodiretrizes a criação de tecnologias apropriadas para os diferentes contextos encontrados e estipula o apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico no setor para a consolidação desse tipo de solução. No mais, reconhece a necessidade da criação de diretrizes específicas para a promoção do saneamento básico para a população rural, reservas extrativistas e comunidades indígenas e quilombolas. Dentre outras de suas macrodiretrizes, destaca-se o fomento às ações de comunicação, mobilização e educação ambiental para o saneamento básico (BRASIL, 2013).

O conceito de tecnologia apropriada (TA) não significa conceber uma tecnologia que seja apropriada a todas as situações, nem sequer que exista uma tecnologia que seja intrinsecamente apropriada. A TA propõe, justamente, que a melhor solução para dada situação dependerá das características desse contexto, de modo que uma tecnologia mais barata e simples pode ser melhor do que outra mais *tecnológica*, a depender do que se objetiva. Tal conceito deu origem a um movimento que ganhou muita força no Brasil e que pautava a importância da adoção de tecnologias capazes de, além de atingir seus objetivos técnicos efetivamente, atender a peculiaridades referentes ao contexto sociocultural no qual a população atendida está inserida. Segundo Ennes (1989), a TA:

“[...] é aquela que permite atender às comunidades com serviços de saneamento em condições sanitárias seguras e eficientes, que seja aceita pelas comunidades e que contemple aspectos construtivos, operacionais e de custos compatíveis com as características socioeconômicas, ambientais e culturais das respectivas comunidades (ENNES, 1989, p.14)”.

Assim sendo, o conceito de TA é de fundamental importância para aqueles que desejam atuar no saneamento rural, o qual em geral exige soluções mais simples e que sejam promovidas a partir de ações de educação ambiental e de processos participativos junto à comunidade. Assim, a concepção de soluções de saneamento rural requer um maior grau de atenção às condicionantes socioculturais se comparadas às soluções tradicionais. Para um maior aprofundamento em relação a essas questões, recomenda-se consultar o capítulo 5 de Chaves (2018).

Neste trabalho, uma tecnologia apropriada para o saneamento rural e seus resultados operacionais são apresentados. Essa tecnologia foi concebida a partir da compreensão de certas características socioculturais gerais do meio rural: baixa den-

sidade demográfica, o que favorece a utilização de soluções unifamiliares; fácil manutenção e operação, visto que os próprios usuários necessitam cuidar de seus sistemas de tratamento; baixo custo e fácil instalação, já que em muitos casos a implantação é feita por meio de processos participativos e mutirões. Com essa tecnologia objetivou-se ter um efluente que pudesse ser devolvido ao solo, de maneira segura, com infiltração subsuperficial, e que poderia ser potencialmente utilizado para irrigação por gotejamento de pomares, reaproveitando-se os nutrientes contidos no efluente final.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo apresentar os resultados operacionais de uma tecnologia apropriada de tratamento de esgoto doméstico projetada para atender a uma família de 3 a 4 pessoas, analisando suas eficiências de remoção para DQO, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, sólidos suspensos e fósforo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Concepção e caracterização do sistema

A tecnologia proposta é um sistema de tratamento descentralizado de esgoto projetado para tratar uma vazão diária de $360 \text{ L}\cdot\text{dia}^{-1}$, o equivalente a aproximadamente uma família de 3 ou 4 pessoas (ABNT, 1993). Para a sua construção, optou-se pelo uso de materiais facilmente encontrados e disponíveis no mercado, atentando-se para a contenção de custos. Os reatores foram montados utilizando-se caixas d'água, materiais que podem ser facilmente encontrados, de baixo custo e que garantem a estanqueidade do sistema. Além disso, a característica modular desse sistema e a facilidade de trabalhar com as caixas d'água devido à sua leveza são importantes, uma vez que se deseja que essa tecnologia possa ser disseminada facilmente por meio de ações de educação ambiental e de metodologias participativas de

mobilização social. A sua simplicidade de implantação e operação são aspectos cruciais. Tais características mostram-se apropriadas à realidade rural, onde normalmente se tem grandes déficits de esgotamento sanitário, mas que possui menos restrições de área devido ao baixo adensamento demográfico. Com isso, tecnologias simples e eficazes podem garantir o tratamento do esgoto próximo ao seu ponto de geração e com isso gerar benefícios agrícolas com a reciclagem dos nutrientes realizada a partir do reúso desse efluente tratado.

A tecnologia proposta é composta por três reatores:

1) Fossa séptica de fluxo ascendente: em um tanque de água comercial de 1000 L, foi utilizado o lodo de um reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA) para dar partida no reator;

2) Decantador: caixa d'água de 500 L. Esse reator foi concebido para reter sólidos suspensos oriundos do tanque séptico e, com isso, evitar o entupimento do alagado construído subsequente;

3) Alagado construído de fluxo ascendente: tanque de água de 1000L com diâmetro interno médio de 1,35m, preenchido com cascalho de diâmetro efetivo (d10) de 7,85 mm, coeficiente de uniformidade de 1,44 e porosidade de 0,45. Espécies naturais de áreas de várzea foram plantadas: *Canna x generalis*, *Coix lacryma-jobi*, *Dioscorea spp* e *Zingiber officinale*.

O tempo de detenção hidráulica geral do sistema foi de 4,7 dias.

2.2 Local de instalação e regime de operação

A montagem experimental foi realizada em uma área existente no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH), localizada dentro da Universidade de São Paulo. Essa área, correspondente ao Centro de Pesquisa em Saneamento, recebe o esgoto sanitário coletado das moradias estudantis e do Restaurante Universitário Central da universidade por meio de uma estação elevatória de esgoto.

2.3 Amostragem e análises realizadas

O sistema foi monitorado por um total de 300 dias, coletando-se uma amostra pontual por semana. Inicialmente, o sistema operou 150 dias com uma carga inferior à carga de projeto, de modo a favorecer a estabilização dos processos de digestão anaeróbia dos primeiros reatores, bem como permitir que houvesse um desenvolvimento radicular das plantas utilizadas no alagado construído. Após isso, o sistema foi monitorado por mais 150 dias, nos quais operou com sua vazão de projeto. Os resultados apresentados são referentes a esses 150 dias em que o sistema operou nessa condição.

Todas as análises foram feitas seguindo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA e IWA, 2017). Na Tabela 1 são sistematizados os métodos selecionados para as análises. O espectrofotômetro utilizado, quando necessário, foi um Agilent Technologies Cary 60 UV-Vis, com software Cary Win UV Simple Reads.

Tabela 1 – Métodos empregados para as análises

Variável	Tipo de amostra	Método	Descrição
pH	Líquido	4500-H+ B	Potenciometria
Alcalinidade Total	Líquido	2320 B	Titulação
Série de Sólidos	Líquido, e biomassa	2540 B, D, E e G	Filtração e Gravimetria
DQO	Líquido	5220 C e D	Espectrofotometria
Nitrito	Líquido filtrado	4110 A	Cromatógrafo de íons
Nitrato	Líquido filtrado	4110 A	Cromatógrafo de íons
N-NH ₃	Líquido	4500-NH ₃ B e C	Destilação e titulometria
NTK	Líquido	4500-Norg B	Digestão, destilação e titulometria
Fósforo Total	Líquido	4500-P.B.4	Digestão, espectrofotometria
Fósforo Solúvel	Líquido filtrado	4500-P.E	Filtração e espectrofotometria
Coliformes Totais	Líquido	9223 B	Kit de cartelas e substrato
E. Coli.	Líquido	9223 B	Kit de cartelas e substrato

Fontes: APHA; AWWA e WEF (2017).

Para a caracterização do esgoto bruto, foram coletadas três amostras todas as quartas-feiras, uma de manhã, uma no horário do almoço e outra no final da tarde. A partir disso, uma mesma proporção de cada uma dessas foi utilizada para obter uma amostra composta, buscando-se com isso ter uma ideia da concentração média afluyente ao sistema.

As amostras do efluente de cada reator foram coletadas uma vez por semana, durante 300 dias, a

partir de pontos de amostragem instalados entre as tubulações que conectam os reatores (Figura 1). Com esses dados, obtidos ao longo de 300 dias de operação, foi possível avaliar as características médias de desempenho do sistema.

Na apresentação dos resultados, o esgoto efluente de cada etapa do tratamento será nomeado com o nome do próprio reator. Ou seja, o esgoto efluente da fossa digestora será identificado como fossa digestora e assim por diante.

Figura 1 – Pontos de amostragem na saída da (a) fossa digestora (b) do decantador (c) do alagado construído

Fonte: Imagens obtidas pelo próprio autor

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do Esgoto Bruto

A Tabela 2 apresenta alguns parâmetros que caracterizam o esgoto bruto estudado. Os resultados indicam que este possui características similares às do esgoto doméstico, com exceção das concentrações

de nitrogênio total Kjeldhal, nitrogênio amoniacal e fósforo total e solúvel, que se mostraram superiores às concentrações típicas (METCALF e EDDY, 2004). Uma hipótese que explica essa característica é que as contribuições oriundas do restaurante universitário concentram uma carga maior de nutrientes em relação ao esgoto doméstico típico.

Tabela 2 - Características do esgoto bruto

	pH	Alcalinidade (mg CaCO ₃)	DQO	SST	SSV	NTK	NH ₄ ⁺	P _{total}	P _{sol}
Núm. Amostras	31	31	22	27	27	32	32	24	24
Máx. (mg.L ⁻¹)	7,3	218	1091	462	454	112	73	11,5	6,4
Mín. (mg.L ⁻¹)	6,0	140	435	98	80	54	37	6,0	4,3
Méd. (mg.L ⁻¹)	6,7	186	702	238	208	70	52	9,0	4,9
Desv. Pad. (mg.L ⁻¹)	0,3	19	188	104	96	13	9	1,4	0,6

3.2 Avaliação do desempenho da tecnologia apropriada para o saneamento rural

3.2.1 DQO_{total} sólidos suspensos e alcalinidade

A Tabela 3 representa o resumo dos dados das concentrações de DQO_{total} medidas para o efluente de cada etapa do tratamento. As Figuras 2 a 4 apresentam a evolução das concentrações registradas para esse parâmetro ao longo do tempo e suas eficiências de remoção.

Como pode se observar na Tabela 2 e nas Figuras 2 a 4, o sistema de tratamento apresentou bom desempenho de remoção de DQO_{total} desde o início do monitoramento, apresentando uma eficiência média global de remoção de DQO de 89%. É importante ressaltar que, como foram coletadas amostras

simples, estas são mais suscetíveis à influência das variações temporais. Nota-se que há um decréscimo do desvio padrão ao longo das etapas de tratamento, o que pode ser explicado pela mistura que ocorre nos reatores, de modo que o efluente coletado em dado momento passa a representar melhor as condições médias de operação de cada reator.

Nas Figuras 2 a 4 pode-se observar que há um aumento de eficiência dos reatores a partir do 40º dia de monitoramento do sistema em plena operação. Isso pode ser atribuído ao equilíbrio alcançado pelo sistema após o aumento da vazão de operação no dia 0. Conclui-se que, apesar das oscilações identificadas nas eficiências de remoção do sistema e do esgoto bruto afluente, esse mostrou-se resiliente e estável.

Tabela 3 - Resumo das concentrações de DQO_{total} efluente durante a fase 3

	Demanda Química de Oxigênio Total			
	Esgoto Bruto	Fossa Digestora	Decantador	Alagado Construído
Núm. amostras	22	22	22	21
Máximo (mg.L ⁻¹)	1091	522	400	171
Mínimo (mg.L ⁻¹)	435	235	133	11
Média (mg.L ⁻¹)	702	385	235	80
Desv. Pad. (mg.L ⁻¹)	188	77	69	35
Remoção média	-	45%	39%	66%
Remoção total média				89%

Figura 2 – Evolução temporal da DQO_{total} afluyente (■) e efluente (◆) à fossa digestora e sua eficiência de remoção (Δ)

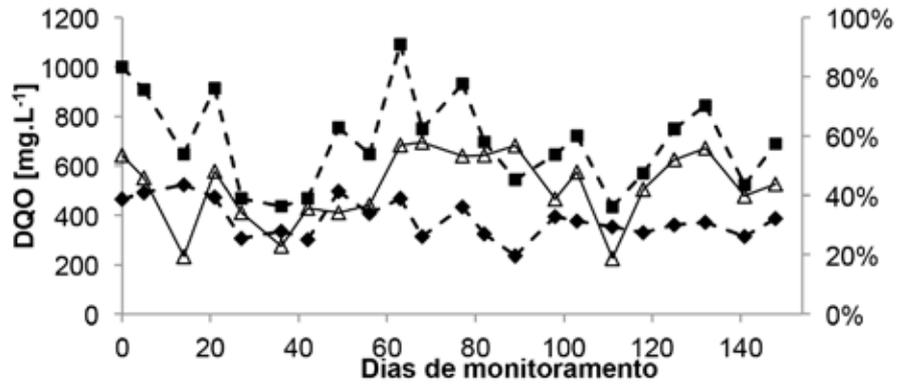


Figura 3 – Evolução temporal da DQO_{total} afluyente (■) e efluente (◆) ao decantador e sua eficiência de remoção (Δ)

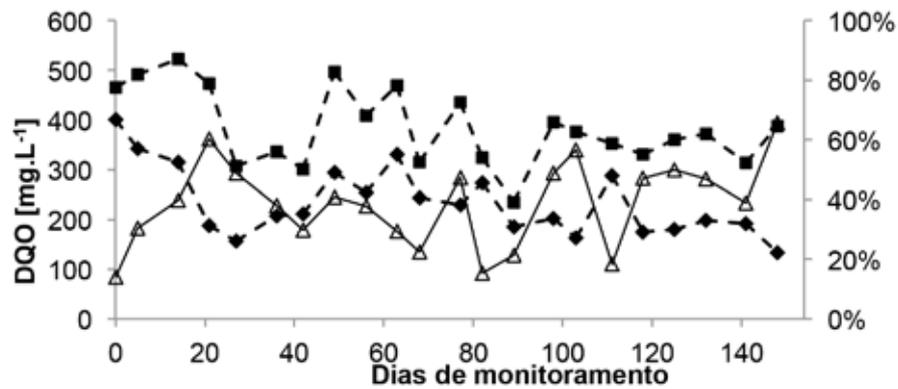


Figura 4 – Evolução temporal da DQO_{total} afluyente (■) e efluente (◆) ao alagado construído e sua eficiência de remoção (Δ)

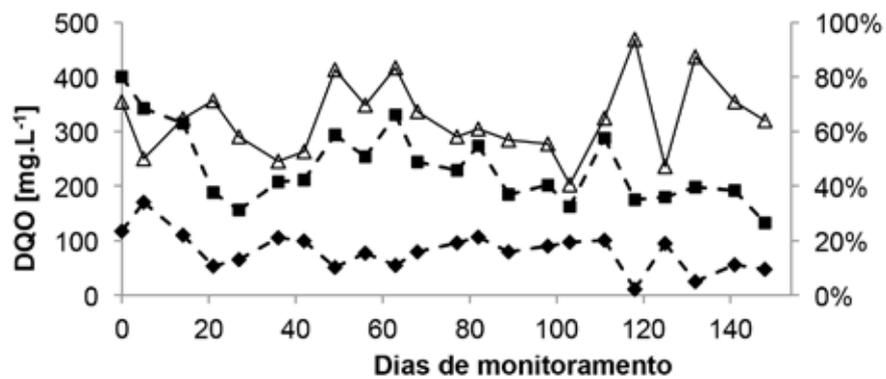
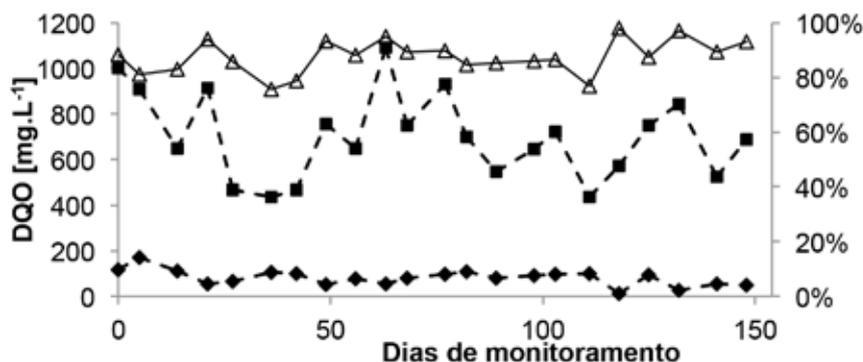


Figura 5 - Evolução temporal do desempenho global do sistema: DQO_{total} afluente (■) e efluente final (◆) e sua eficiência de remoção (Δ)



As concentrações de sólidos efluentes de cada estágio do sistema de tratamento são apresentadas na Figura 6. Observa-se uma grande variação da concentração efluente de sólidos totais da fossa digestora, que ocorreu em decorrência das variações do esgoto bruto afluente e do arraste de sólidos que acumulam no fundo deste reator. O decantador foi capaz de manter-se estável frente a essas oscilações, o que mostra que foi capaz de cumprir seu papel de reter o excesso de sólidos arrastado da fossa diges-

tora, de modo a evitar que ocorresse um acúmulo excessivo de sólidos no leito “filtrante” do alagado construído. O alagado construído também apresentou comportamento estável, e a média da eficiência global de remoção de sólidos suspensos totais foi de $92 \pm 7\%$, com uma concentração média de 19 mg.L^{-1} de SST no efluente tratado final do sistema. A Tabela 4 apresenta o resumo das concentrações de sólidos medidas para o efluente de cada reator do sistema durante o monitoramento apresentado.

Figura 6 - Concentração de sólidos suspensos do esgoto bruto (■), do efluente da fossa digestora (◆), do decantador (Δ) e do alagado construído (●)

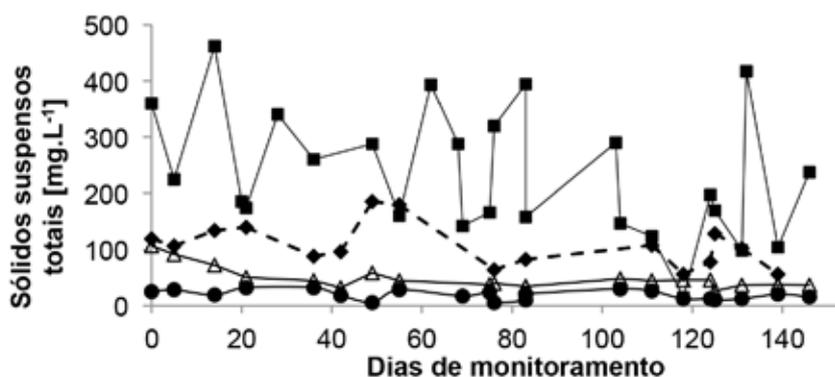


Tabela 4 – Caracterização da concentração de sólidos dos efluentes de cada estágio do sistema

	Esgoto Bruto		Fossa Digestora		Decantador		Alagado Construído	
	SST	SSV	SST	SSV	SST	SSV	SST	SSV
Núm. Amostras	27	27	18	18	20	20	21	21
Máximo (mg.L⁻¹)	462	454	217	200	106	100	32	32
Mínimo (mg.L⁻¹)	98	80	56	50	26	22	6	6
Média (mg.L⁻¹)	238	208	113	101	48	44	19	18
Desvio padrão (mg.L⁻¹)	104	96	45,0	41,3	20,2	19,4	8,3	7,4

Na Tabela 5 são comparadas a carga de DQO_{total} recebida pelo alagado construído estudado com valores apresentados em outros trabalhos que estudaram o desempenho de alagados de fluxo vertical ascendente tratando esgoto doméstico.

Tabela 5 – Comparação com alguns parâmetros operacionais apresentados na literatura

	Área Transv. (m ²)	TDH (d)	Taxa de aplicação (m.d ⁻¹)	Carga DQO (g.m ⁻² .d ⁻¹)	Remoção DQO	Material de preenchimento
Este trabalho	1,4	1,06	0,26	60,4	66%	Brita
Abdelhakeem et al. (2016)	0,09	0,5	0,15	112,3	70%	Brita
Chang et al. (2011)	4,6	3	0,02	2,1	81%-87%	Brita, areia, argila expandida, vermiculita, calcário, migalhas de pneu, serragem
Debska et al. (2015)	30		0,033	25,0	95%	Areia grossa (1-2 mm)
Sousa et al.* (2000)	10	5	0,045	13,2 – 14,1	79 – 81%	Areia grossa (2,88 – 4,8 mm)
		7	0,033	9,2 – 10,1	81 – 84%	
		10	0,023	6,6 – 7,1	84 – 84%	

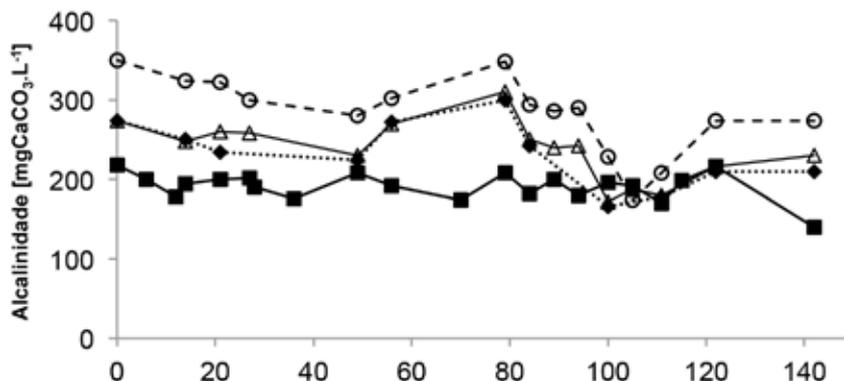
*Alagado construído horizontal

Como se pode observar, há um grande espectro de cargas de aplicação de DQO relatadas. O alagado construído deste trabalho operou com grande carga de DQO afluyente (60 g.m⁻².dia⁻¹), e sua eficiência de remoção mostrou-se satisfatória quando comparada com os outros trabalhos encontrados na literatura. Em termos de sólidos suspensos, o alagado construído operou com carga de 12,3 g.m⁻².dia⁻¹. Apesar de ser uma carga mais alta do que algumas relatadas na literatura, como Moreno et al. (2002) e Farahbakshzad e Morrison (2003), que trabalham com 5,1 e 4,7 g.m⁻².dia⁻¹ respectivamente, esse valor é inferior à recomendação determinada por Sezerino (2006), que conclui que a carga de sólidos suspensos deve ser inferior a 16 g.m⁻².dia⁻¹ – tomando-se como base a área transversal ao escoamento – para garantir-se boa

eficiência de remoção de DQO e sólidos suspensos e evitar riscos de colmatação.

Os valores de alcalinidade registrados para o efluente de cada etapa do tratamento são apresentados na Figura 7. O aumento de alcalinidade no efluente da fossa digestora, associado à remoção de matéria orgânica ocorrida nessa etapa, indica que o processo de digestão anaeróbia esteve bem equilibrado e estabelecido. Já o incremento de alcalinidade do efluente do alagado construído pode ser explicado pela baixa nitrificação, a qual seria responsável por um consumo de alcalinidade, ocorrida no reator, e pelos processos de digestão anaeróbia que também ocorrem no interior do reator, cujo meio filtrante permanece constantemente saturado.

Figura 7 – Alcalinidade do esgoto bruto (■), do efluente da fossa digestora (◆), do decantador (Δ) e do alagado construído (O)



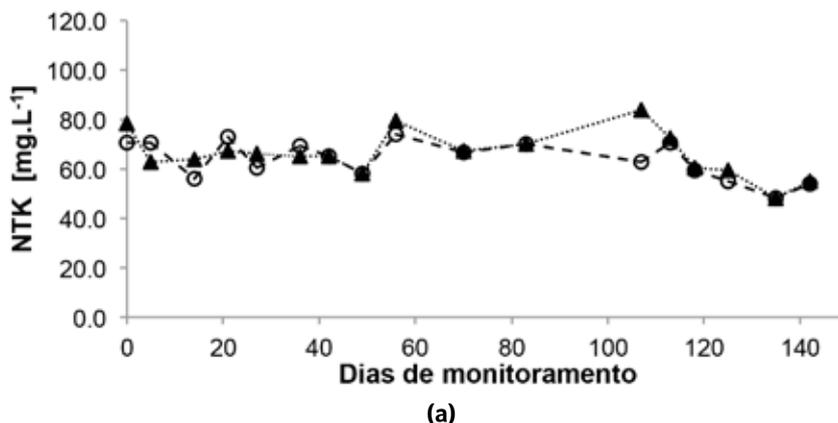
3.2.2 Compostos nitrogenados e fósforo

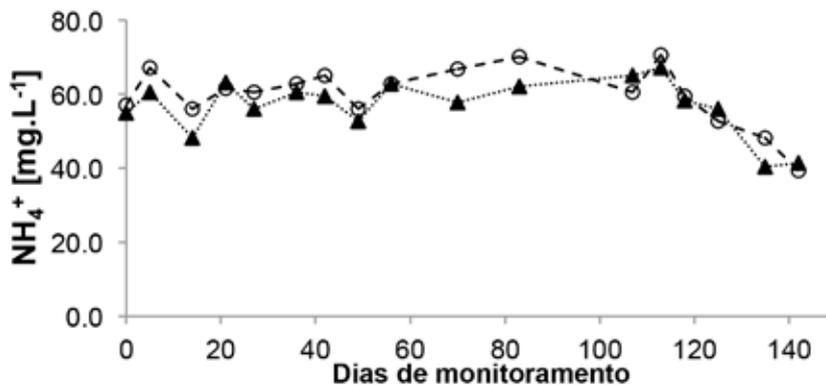
Como não ocorre remoção significativa de nitrogênio e fósforo em reatores anaeróbios como os estudados nesse trabalho, os resultados para o efluente da fossa digestora não foram considerados, apesar de monitorados. Além disso, as concentrações de compostos nitrogenados e de fósforo do esgoto bruto apresentaram grandes variações, o que em parte é explicado pelo método de amostragem e pelas grandes variações que de fato ocorrem nessas concentrações ao longo do dia por conta das atividades do Restaurante Universitário. A concentração de NTK efluente da etapa anaeróbia é então considerada uma

concentração média do esgoto bruto, apesar de ser esperada uma pequena remoção devido aos processos microbiológicos que ocorrem em seu interior. Acredita-se que com essa aproximação pode-se melhor garantir a qualidade da análise das eficiências de remoção desses nutrientes no alagado construído e do sistema como um todo.

As concentrações de NTK e de NH₄⁺ do efluente do decantador (afluente do alagado construído) e do efluente do alagado construído estão apresentadas na Figura 8. Na Figura 9 estão apresentadas as concentrações de fósforo total e solúvel efluentes da etapa anaeróbia (decantador) e do alagado construído.

Figura 8 – (a) NTK efluente do decantador (▲) e do alagado construído (O); (b) NH₄⁺ efluente do decantador (▲) e do alagado construído (O)





(b)

A Figura 7(b) mostra uma tendência de aumento da concentração de NH_4^+ no efluente do alagado construído, o que é explicado pela mineralização do nitrogênio presente em compostos orgânicos. Já a Figura 7(a), juntamente com o resumo dos dados apresentados na Tabela 6, indica que não houve remoção significativa de compostos nitrogenados no leito do alagado construído, visto que as diferenças de concentração média calculada são menores do que o desvio padrão dessas concentrações.

Tabela 6 – Concentrações de NTK e NH_4^+

	Decantador		Alagado Construído			
	NTK	NH_4^+	NTK	NH_4^+	Nitrato	Nitrato
Núm. amostras	17	17	17	17	7	7
Máximo (mg.L^{-1})	84	67	74	71	0,24	0,56
Mínimo (mg.L^{-1})	48	40	48	39	0,00	0,38
Média (mg.L^{-1})	66	57	64	60	0,08	0,48
Desv. Pad. (mg.L^{-1})	9,1	7,6	7,7	8,0	0,11	0,06

A principal hipótese admitida para a explicação da baixa eficiência de remoção de nitrogênio do sistema é a alta carga de nitrogênio total a que o sistema foi submetido. Na Tabela 7 é apresentada uma comparação da eficiência de remoção desse

sistema com a de outros trabalhos relevantes encontrados na literatura.

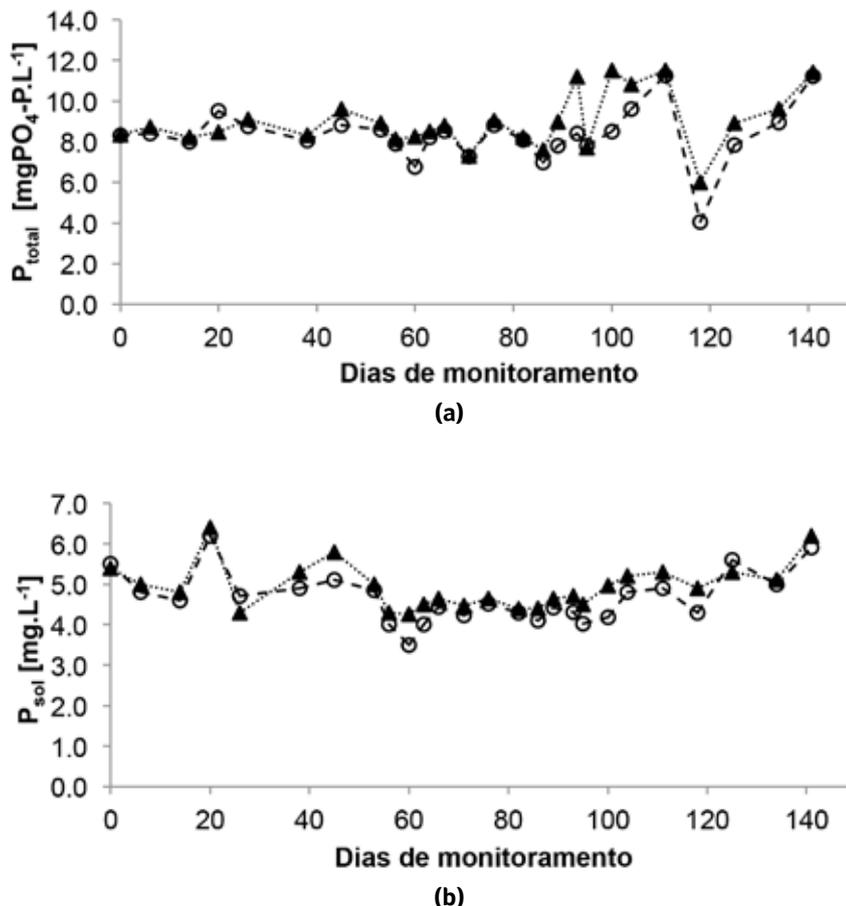
Tabela 7 - Comparação com cargas de nitrogênio total aplicadas na literatura em outros alagados construídos verticais

	Carga NT $\text{g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$	Remoção NT	Tipo de esgoto
Este trabalho	17,0	Insignificante	Esgoto doméstico
Abdelhakeem et al. (2016)	8,7	19%	Esgoto doméstico
Chang et al. (2011)	1,7	62,5 - 97,1%	Esgoto doméstico
Farahbakshazad (2000)	4,8	94%	Esgoto doméstico
Moreno et al. (2002)	8,1	90%	Efluente de refinaria de petróleo
Debska et al. (2015)	2,54	55%	Esgoto doméstico
Sousa et al. (2000)*	2,6	59 - 65%	Esgoto doméstico
	1,9	59 - 65%	Esgoto doméstico
	1,3	76 - 87%	Esgoto doméstico
Tanner (1994)	2,50	32%	Efluente de suinocultura

*Alagado construído horizontal

Na Figura 9 são apresentadas as concentrações de fósforo total e solúvel efluentes da etapa anaeróbia (decantador) e do alagado construído.

Figura 9 – (a) Concentrações de fósforo total e (b) Concentrações de fósforo solúvel do efluente do decantador (▲) e do alagado construído (○);



Os resultados apresentados na Figura 8 e resumidos na Tabela 8 mostram que não houve remoção significativa de fósforo no alagado construído. A pequena remoção média observada, da ordem de 6% tanto para o fósforo total como para o solúvel, pode ser explicada por fenômenos físicos de filtração capazes de remover uma parte do fósforo orgânico junto com a remoção de sólidos; já a remoção do fósforo em sua forma solúvel é resultado do consumo desse nutriente pelas plantas e da adsorção que ocorre na su-

perfície da brita. Como esperado, a remoção resultante desses processos foi pequena, uma vez que a capacidade de adsorção da brita é muito baixa e o consumo pelas plantas é muito pequeno comparado à carga de fósforo aplicada. Além de esperada, a baixa eficiência de remoção de nutrientes é desejada para que possam ser reciclados na agricultura como biofertilizantes. Na Tabela 9 apresenta-se uma comparação da carga a que esse sistema foi submetido com outros encontrados na literatura.

Tabela 8 - Concentrações de fósforo total e solúvel

	Decantador		Alagado Construído	
	P-total	P-sol	P-total	P-sol
Núm. amostras	26	26	26	26
Máximo (mg.L ⁻¹)	11,5	6,4	11,3	6,2
Mínimo (mg.L ⁻¹)	6,0	4,3	4,1	3,5
Média (mg.L ⁻¹)	9,0	5,0	8,4	4,7
Desv. Pad. (mg.L ⁻¹)	1,4	0,6	1,3	0,6

Tabela 9 - Comparação com cargas de fósforo aplicadas em alagados construídos verticais na literatura tratando esgoto doméstico

	Carga NT g.m ⁻² .d ⁻¹	Remoção TP
Este trabalho	2,3	Insignificante
Abdelhakeem et al. (2016)	0,47	19%
Chang et al. (2011)	0,13	95,7 - 98,3%
Debska et al. (2015)	0,57	88%
Sousa et al. (2000)*	0,25 - 0,29	78 - 88%
	0,18 - 0,21	84 - 88%
	0,12 - 0,14	99,9 - 100%

*Alagado construído horizontal

3.2.3 Coliformes e oxigênio dissolvido

Foram coletadas 6 amostras de esgoto bruto, do efluente do decantador e do efluente do alagado construído com o intuito de caracterizá-los quanto à sua concentração de coliformes ter-

motolerantes, parâmetro utilizado pela norma NBR13969 (ABNT, 1997). Segundo essa norma, deve-se atingir concentração de coliforme fecal inferior a 5000 NMP/100mL e oxigênio dissolvido acima de 2,0 mg.L⁻¹ para reúso do esgoto tratado em pomares, produção de cereais, pastagens para gados e outros cultivos que usem sistemas de escoamento superficial ou irrigação pontual.

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados obtidos. O sistema apresentou uma boa remoção de coliformes termotolerantes (2,5 log), porém a média da concentração desse indicador encontrada no efluente não foi capaz de atender aos parâmetros estipulados pela NBR13969.

Para as mesmas amostras do efluente do alagado construído foi medido o oxigênio dissolvido (OD), cujo valor médio foi de 0,61 ± 0,17 mg O₂.L⁻¹. Os valores de OD encontrados também não atenderam a essa norma. Para aumentar a oxigenação do efluente final, acredita-se que seria necessária uma etapa de polimento, como, por exemplo, uma lagoa de maturação ou uma lagoa com macrófitas flutuantes, alimentadas por uma cascata para favorecer a aeração, entre outras possíveis opções existentes.

Tabela 7 - Número mais provável de coliformes totais e termotolerantes

	Bruto		Decantador		Alagado Construído	
	Colif. Totais	Colif. Termotolerantes	Colif. Totais	Colif. Termotolerantes	Colif. Totais	Colif. Termotolerantes
Núm. amostras	6	6	6	6	6	6
Mín. (NMP/100 mL)	3,6.10 ⁷	2,0.10 ⁶	2,6.10 ⁶	4,0.10 ⁴	3,9.10 ⁵	1,0.10 ⁴
Máx. (NMP/100mL)	2,5.10 ⁹	2,3.10 ⁸	3,1.10 ⁷	3,8.10 ⁶	8,7.10 ⁶	4,7.10 ⁵
Média geométrica (NMP/100mL)	3,7.10 ⁸	1,5.10 ⁷	7,1.10 ⁶	4,2.10 ⁵	1,2.10 ⁶	5,0.10 ⁴
Remoção (log)	-	-	1,7	1,6	0,8	0,9

Contudo, deve-se ressaltar que as determinações da NBR13969 (1997) são muito restritivas, principalmente em casos em que se aplica irrigação por gotejamento e em alimentos que serão ingeridos cozidos, situações nas quais o próprio solo pode atuar, de maneira segura e eficaz, como uma barreira aos patógenos. Segundo a WHO (2006),

quando realizada a irrigação por gotejamento de culturas cujos alimentos fornecidos estão distantes do solo, o solo é capaz de representar uma remoção de 4 log. Sob essa perspectiva, a tecnologia avaliada pode ser considerada para promover o reúso para irrigação de pomares e de culturas como milho, feijão, entre outras. Deve-se atentar

que a área dos pomares não deve ser uma área de lazer de crianças, o que representaria um maior risco de contaminação, e, segundo WHO (2006), exigiria critérios mais exigentes de tratamento que os atingidos.

4 CONCLUSÃO

A tecnologia proposta teve como objetivo atender a algumas das características geralmente encontradas no meio rural: necessidade de soluções de baixo custo, fácil manutenção e instalação, que sejam capazes de tratar as águas residuárias transformando-as em um efluente que possa ser devolvido à natureza de maneira segura.

Os resultados obtidos foram satisfatórios e levam à conclusão de que o sistema proposto é efetivo para atender a uma família de 3 a 4 pessoas. Apesar de certo arraste de sólidos ter sido observado na fossa digestora, isso era esperado, e ocorreu sobretudo devido às variações do esgoto bruto afluente que em alguns momentos carregava consigo altas concentrações de sólidos e DQO_{total}. O decantador, etapa subsequente, cumpriu seu papel, de modo que foi capaz de reter os sólidos suspensos de maneira eficaz (eficiência de remoção de 57,5%). Com isso, garantiu-se que o esgoto afluente ao alagado construído tivesse uma carga de sólidos adequada para sua operação, sem apresentar riscos de colmatção para a zona de raízes. O alagado construído operou com carga de 60 gDQO.m⁻².dia⁻¹ e de 12,3 gSST.m⁻².dia⁻¹, atendendo à recomendação determinada por Sezerino (2006), que postula que a carga de sólidos suspensos deve ser inferior a 16gSST.m⁻².dia⁻¹. A eficiência global média de remoção de DQO foi de 89% ± 6%, e a de sólidos suspensos totais, de 92% ± 7%. O sistema mostrou-se resiliente e estável mesmo trabalhando com grandes cargas de DQO, e apresentou um efluente final com concentrações de coliformes termotolerantes aceitáveis para o reúso por irrigação por gotejamento em pomares isolados que não sirvam de espaço de lazer para

crianças, de acordo com os critérios de avaliação de risco à saúde estipulados pela WHO (2006).

No que diz respeito à remoção de coliformes termotolerantes, a eficiência do sistema foi de 99,5%. A eficiência de remoção de nitrogênio e fósforo do sistema foi quase nula, o que era esperado e até mesmo desejado, visto que esses nutrientes poderão retornar ao solo e contribuir para a irrigação de pomares.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq pela bolsa de pesquisa 133676/2016-1 e à gestão da ETA Cubatão da Sabesp, que forneceu o lodo necessário à pesquisa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELHAKHEEM, S. G.; ABOULROOS, S. A.; KAMEL, M. M. Performance of a vertical subsurface flow constructed wetland under different operational conditions. *Journal of Advanced Research*, v. 7, n. 5, p. 803-814, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7229 – Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos**. Rio de Janeiro, 1993

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13969 – Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1997

APHA, AWWA e IWA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23 ed. Centennial Edition 2017

BORJA, P. C.; MORAES, L. R. S. Paradigmas tecnológicos do saneamento básico. In: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013, Goiânia, GO. **Anais do 27º Congresso da ABES**. Rio de Janeiro, RJ: ABES, 2013. p 1-9.

BRASIL. **Lei Nº 11.445**, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>

_____, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB**. Brasília. 2013.

CHAVES, V. T. **Sistema de saneamento ecológico com reutilização de lodo férrico para remoção de fósforo e um novo para-**

digma para o saneamento. Dissertação (Mestrado em Ciências), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 154p. 2018

CHANG, N. B.; XUAN, Z.; DARANPOB, A.; WANIELISTA, M. A. Sub-surface upflow wetland system for removal of nutrients and pathogens in on-site sewage treatment and disposal systems. **Environmental Engineering Science**. v.28, n. 1, p. 11 – 24, 2011. <https://doi.org/10.1089/ees.2010.0087>

DEBSKA, A. et al. The efficiency of pollution removal from domestic wastewater in constructed wetland systems with vertical flow with common reed and glyceria maxima. **Journal of Ecological Engineering**, v. 16, n. 5, 2015.

ENNES, Y. M. O saneamento no Brasil, repassado à luz da tecnologia apropriada. **Revista Mineira de Engenharia**, v. 3, n. 6, p. 13-16, 1989.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas do Saneamento Básico**. Rio de Janeiro, 2011.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas populacionais para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros em 01.07.2016**. Brasil, 2016.

METCALF, E. EDDY; EDDY, H. **Wastewater engineer treatment disposal, reuse**. New York: McGraw, 2004.

MORENO, C.; et al. Ammonia removal from oil refinery effluent in vertical upflow macrophyte column systems. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 135, p. 237-247. 2002

REZENDE, S. C.; HELLER, L. **O saneamento no Brasil: Políticas e interfaces**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008, 387p.

SEZERINO, P. H. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima tropical**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.

SOUSA, J. T. et al. Pós-tratamento de efluente de reator UASB utilizando sistemas “wetlands” construídos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n.1, p. 87-91, Campina Grande, Paraíba: 2000.

TANNER, C. C. Treatment of dairy farm wastewaters in horizontal and up-flow gravel-bed constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v. 29, n. 4, p. 85-93, 1994.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**. World Health Organization, 2006.