

SISTEMA HÍBRIDO PARA FILTRAÇÃO E DESINFECÇÃO DE EFLUENTE DE LAGOAS

Welitom Ttatom Pereira da Silva

Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil
wttatom@terra.com.br

A. de Almeida Santos

Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil

H. Rodrigues Filho

Gerenciamento de Obras e Projetos de Edificações, Universidade Paulista, Brasil

L. Airton Gomes

Faculdade de Tecnologia, Engenharia e Arquitetura, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil

Resumo: O principal objetivo deste estudo foi desenvolver uma unidade de pós-tratamento, para remoção de sólidos totais em suspensão e coliformes termotolerantes, dos efluentes de um conjunto de lagoas de estabilização, que trata despejos de uma indústria alimentícia. Para tal, foi construído um filtro ascendente em série com uma câmara de contato (sistema híbrido). O monitoramento do sistema complementar apresentou bons resultados em termos de remoção de DQO, DBO e sólidos em suspensão totais, com valores de eficiência variando entre 54–83 %, 70–90 % e 51–92 %, respectivamente, para uma taxa hidráulica aplicada, variando de 0,01 a 0,09 m³/m² × d. Com relação aos microrganismos patogênicos, obteve-se uma completa remoção de coliformes termotolerantes usando Fator $C \times t$ de 25 mg/L × min., a temperatura ambiente de 29 ± 1,5 °C.

INTRODUÇÃO

Os sistemas de lagoas de estabilização constituem-se na forma mais simples para o tratamento de esgotos (von Sperling, 1996). Devido ao fato de se tratar de um processo com baixo custo de implantação e relativa facilidade operacional, as lagoas de estabilização são bastante atrativas, principalmente em regiões de clima quente e onde a disponibilidade de área não é um fator limitante. Neste cenário, encontra-se a Baixada Cuiabana, região que compreende treze municípios do Estado de Mato Grosso, Brasil, destacando-se dentre eles Cuiabá e Várzea Grande, que apresenta inúmeros sistemas de lagoas de estabilização e temperaturas médias de 27 °C (CUIABÁ, 2007). Entretanto, com a crescente exigência dos órgãos ambientais por melhor qualidade dos efluentes, as lagoas de estabilização passaram a ter seu uso limitado em função da frequente presença de sólidos suspensos e a remoção não satisfatória de coliformes termotolerantes (Araújo *et al.*, 2005). Von Sperling (1996) apresenta várias formas de se melhorar

à qualidade do efluente de lagoas, visando principalmente à remoção de sólidos em suspensão, dentre elas: filtros de areia intermitentes; filtros de pedra; micropeneiras; lagoas com macrofilas flutuantes; aplicação em solos com gramíneas; processos de coagulação e clarificação; flotação e biofilmes aerados. Sezerino *et al.* (2005) propuseram um filtro de pedra como pós-tratamento de efluente de lagoa de estabilização, como resultados verificaram-se elevada remoção de sólidos suspensos, assim como reduzida atividade operacional, a qual se limitou apenas em descargas de fundo e aferição da vazão afluente. Andrada *et al.* (2005) investigaram um sistema com filtros de pedra para o polimento do efluente de lagoas, a investigação indicou excelentes resultados com a possibilidade do uso agrícola irrestrito, usos urbanos e industrial restritos. Nelder *et al.* (2000) desenvolveram no Distrito Federal do Brasil, um projeto de pesquisa em escala piloto que avaliou cinco processos naturais, dentre eles: filtro intermitente de areia; filtro de pedra; escoamento superficial (aplicação no solo); wetlands de fluxo subsuperficial (com *Typha La-*

tifolia); tanques com plantas aquáticas flutuantes. Os resultados indicaram como inconveniente à obstrução parcial ou total, indicando uma maior atenção na operação dos sistemas. Palacios e Timmons (2001) realizaram estudos para a determinação de parâmetros de projeto, para o uso de um leito de areia no tratamento de efluentes de piscicultura. Como resultados, obtiveram-se uma modificação na equação de Darcy baseada na concentração de sólidos suspensos totais e na frequência de aplicação de efluente. Veschett *et al.* (2002) realizaram um estudo comparando, em planta piloto, o ácido periacético com hipoclorito de sódio para a desinfecção de efluentes, os resultados indicaram ambos desinfetantes apresentaram comportamentos similares. Kitis (2003) apresentou alguns estudos que empregando agentes de desinfecção a remoção de bactérias, vírus, fungos e esporos, entre os principais desinfetantes destacou-se o ácido periacético.

OBJETIVOS

Frente a um contexto de inúmeras possibilidades ao pós-tratamento de efluentes em lagoa de estabilização e a carência de estudos no Estado de Mato Grosso, Brasil, o presente trabalho se propôs a desenvolver e avaliar uma unidade piloto destinada à remoção de sólidos suspensos totais e coliformes termotolerantes. Como inovação o estudo traz o fato de se pensar numa unidade de pós-tratamento que mescla filtro de areia com câmara de contato (sistema híbrido). Essa mescla proporcionaria redução de área útil e eficiência na mistura do desinfetante.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, optou-se pelo delineamento experimental subdividido em cinco etapas: (i) desenvolvimento do aparato experimental (sistema híbrido); (ii) definição das condições operacionais; (iii) monitoramento do experimento; (iv) análise dos dados; (v) abordagem de custos.

Desenvolvimento do aparato experimental (sistema híbrido)

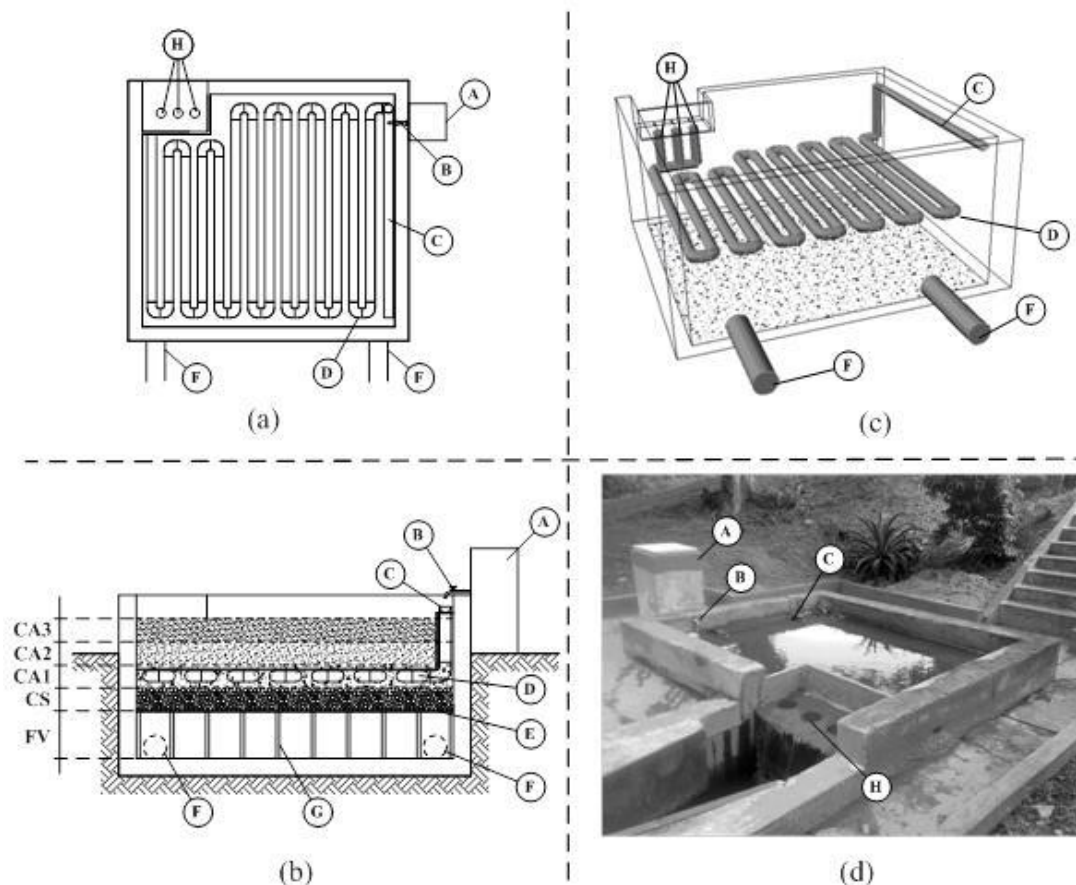
Os experimentos com o protótipo do sistema híbrido (PSH), para remoção de sólidos suspensos totais e coliformes termotolerantes, foram realizados numa estação de tratamento de despejo industrial existente na Baixada Cuiabana, Estado de Mato Grosso, Brasil. A estação de tratamento de despejo industrial faz parte de uma planta agroindustrial produtora de alimentos derivados de carne. Essa se constitui de diversas unidades tratadoras, dentre elas: grade grosseira; peneira; caixa de areia; lagoa anaeróbia, facultativa e de maturação. Da estação de tratamento de despejo industrial, especificamente da lagoa de maturação, uma parcela do despejo industrial foi encaminhado ao PSH, sendo esse o afluente do PSH. A necessidade de atendimento a legislação ambiental (requisitos de sólidos em suspensão totais e de coliformes termotolerantes), a indisponibilidade de área para ampliação da estação de tratamento de despejo industrial e a constante busca por redução de custo, foram os fatores motivadores do desenvolvimento do estudo. A Tabela 1 apresenta requisitos de qualidade de efluente para lançamento em mananciais e a para utilização na agricultura.

Variáveis	CONAMA ⁽¹⁾	EPA ⁽²⁾	OMS ⁽³⁾	CEE ⁽⁴⁾
Temperatura (°C)	< 40	(n.a.)	(n.a.)	(n.a.)
pH	5,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	(n.a.)
DQO (mg/L)	(n.a.)	(na)	(n.a.)	125
DBO (mg/L)	(n.a.)	30	< 10	25
Sólidos em suspensão totais (mg/L)	(n.a.)	30	(n.a.)	35
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	(n.a.)	(n.a.)	≤ 1000	(n.a.)

⁽¹⁾ CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil), Resolução No. 357 de 17/03/2005; ⁽²⁾ EPA: Agência de Proteção Ambiental (U.S.), Metcalf & Eddy (1991);

⁽³⁾ OMS: Organização Mundial da Saúde, WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater (2006); ⁽⁴⁾ CEE: Comissão das Comunidades Europeias (União Européia), Directiva No 91/271/CEE de 21/05/1991; (n.a.) não apresenta

Tabela 1. Qualidade de efluente para lançamento em mananciais e utilização na agricultura



A: reservatório de desinfetante, capacidade 100L; B: válvula para controle de dosagem; C: calha coletora de efluente filtrado; D: câmara de contato intra-leito filtrante; E: fundo falso; F: tubulações de entrada de afluente; G: pilar de apoio; H: ponto de saída do efluente filtrado e desinfetado; FV: fundo verdadeiro; CS: camada suporte; CA1: camada filtrante 1; CA2: camada filtrante 2; CA3: camada filtrante 3

Figura 1. Esquema do aparato experimental; (a) vista em planta; (b) vista em corte; (c) disposição da calha coletora e câmara de contato, intraleito filtrante; (d) registro fotográfico do PSH em operação

O PSH foi construído em escala piloto e projetado de modo a mesclar duas diferentes unidades tratadoras, um filtro ascendente e um misturador hidráulico. Para tal, utilizou-se como auxílio no dimensionamento à norma ABNT-NBR 12216 (1992). Adotou-se, para o filtro um leito filtrante (LF) estratificado em 4 camadas (CS, CA1, CA2, e CA3) e para o misturador hidráulico o tipo chicanas de fluxo horizontal, aqui na função de câmara de contato (D). Na Figura 1, esta apresenta o aparato experimental do PSH, com vista em planta (1a), vista em corte (1b), disposição da calha coletora e câmara de contato, intraleito filtrante (1c) e registro fotográfico do PSH em operação (1d).

O PSH orienta o efluente a passar, necessariamente, pelas seguintes operações sequenciais: entrada no PSH (F); enchimento do fundo ver-

dadeiro (FV); filtração (CS, CA1, CA2 e CA3); coleta do efluente filtrado (C); aplicação de desinfetante (B); desinfecção na câmara de contato (D); saída do PSH (H). O PSH foi construído em alvenaria, sob a forma retangular, com dimensões de 2,50×2,70m. Como pilar de apoio (G) ao fundo falso (E) utilizou-se toras de madeira com diâmetro 50mm e altura de 40cm, espaçadas de 30 em 30cm. Como fundo falso (E), utilizou-se uma tela quadrada soldada com malha de 2,5×2,5cm em vergalhão em aço de superfície nervurada de diâmetro 6,3mm. Apesar de o PSH ter sido dimensionado como um filtro ascendente, o LF foi constituído por materiais comumente utilizados como agregados na construção civil, entre eles: a brita 5, diâmetro 76–100mm (CS); a brita 2, diâmetro

Parâmetro operacional	Codificação	Unidade	Faixa de valores adotados
Vazão afluyente	Q	m ³ /h	5 – 30 ⁽¹⁾
Taxa de filtração	TF	m ³ /m ² ×d	8,8 – 53,3 ⁽¹⁾
Taxa hidráulica aplicada	THA	m ³ /m ³ ×d	0,01 – 0,09 ⁽¹⁾
Tempo de operação diário	TOD	h/d	12 – 24 ⁽²⁾
Tempo de contato	t	min.	0,5 – 3,1 ⁽¹⁾
Cloro residual livre	C	mg/L	0,5 – 15 ⁽³⁾

⁽¹⁾ variação devido à disponibilidade de efluente e a capacidade de tratamento do PSH; ⁽²⁾ regime de operação intermitente; ⁽³⁾ variação devido à necessidade de estudo do comportamento da concentração de coliformes termotolerantes frente a diversas concentrações de cloro residual livre

Tabela 2. Parâmetros operacionais

12,5–25mm (CA1); o pedrisco, diâmetro 2,00–4,80mm (CA2); a areia, diâmetro 0,05–0,42mm (CA3). Sendo adotado para todas as camadas a espessura de 20cm. Como justificativa para a adoção destes materiais destacam-se as diferenças entre a qualidade de água decantada e o efluente de lagoas de maturação, a disponibilidade e os baixos custos para obtenção destes. A câmara de contato (D) e a calha coletora (C) foram construídas em tubulação de PVC diâmetro 100mm, montada de forma que efluente tenha um regime hidráulico de fluxo em pistão, proporcionado mesmo tempo de permanência de cada partícula do efluente e mesma concentração de desinfetante ao longo da câmara de contato (Daniel *et al.*, 2001). A configuração resultou num pistão com extensão de 32m, volume de 255L e 14 compartimentos de mudança horizontal de direção (acoplamento de 2 joelhos PVC, diâmetro 100mm).

A seleção do hipoclorito de sódio como o agente de desinfecção foi justificada pelos seguintes elementos: carência de pesquisa que empreguem este desinfetante na região; existência de variedade de trabalhos apresentando resultados satisfatórios à desinfecção de efluentes; facilidade de aplicação em pequenas vazões operacionais; baixo risco de manuseio e armazenamento. Optou-se ainda, pela instalação de um pequeno reservatório (A) com capacidade de 100L próximo a entrada do efluente na câmara de contato (D).

Condições operacionais

A hidráulica operacional do PSH obedeceu à concepção de um filtro com taxas e cargas variáveis (sistema onde a perda de carga aumenta com o passar do tempo reduzindo as taxas aplicadas). A determinação da vazão máxima de tratamento realizou-se pelo método da tentativa e erro, sendo definido como tentativa o

acréscimo de 5m³/h a vazão tratada e o erro a visualização da perda de material filtrante ou a visualização de curto circuito hidráulico. O teste resultou numa vazão limite de 35m³/h, sendo então adotado para operação a vazão máxima de 30m³/h. A natureza inovadora do PSH e a dificuldade de obtenção de referencial teórico com características similares motivaram a realização desses testes. As características operacionais do PSH podem ser resumidas na Tabela 2.

Monitoramento do experimento

Foram mensuradas as seguintes variáveis: temperatura (TP), pH, DBO, DQO, sólidos em suspensão totais (SST), cloro residual livre (C) e coliformes termotolerantes (CT). As análises foram realizadas de acordo com os procedimentos descritos no AWWA-APHA-WEF (1995). A rotina de coleta e amostragem foi realizada pela técnica de amostragem composta, recomendada quando se deseja minimizar o número de amostras e obter maior representatividade de um dia operacional (Braille e Cavalcanti, 1993). No caso, a amostragem de 1 dia se constituiu da mistura de volumes iguais de 3 amostras pontuais coletadas em intervalo de 1h. Os pontos amostrados foram o afluyente e efluente da PSH, sendo estes denominados P1 e P2, respectivamente. A periodicidade da coleta foi semanal e o período de monitoramento do experimento foi de quatro meses.

Análise dos dados

Para a análise dos dados realizou-se análise estatística descritiva, cálculo do coeficiente de variação, elaboração de gráficos de barras e de diagramas de dispersão. Para análise de eficácia de desinfecção estudou-se o Fator $C \times t$ (concentração \times tempo de contato), por meio da elaboração de diagrama de dispersão, eficiência

de remoção de coliformes termotolerantes *versus* Fator $C \times t$ (Lapoli *et al.*, 2005; Tsai e Lin, 1999). Estudos para avaliação da aderência dos modelos de desinfecção foram realizados objetivando contribuir com o planejamento operacional e a elaboração de futuros projetos. Os modelos de desinfecção Chick-Watson, Hom e Selleck, Eqs.(1), (2) e (3), foram avaliados (Lee e Nam, 2002)

$$\log \frac{N}{N_0} = -k \times C^n \times t \quad (1)$$

$$\log \frac{N}{N_0} = -k \times C^n \times t^m \quad (2)$$

$$\log \frac{N}{N_0} = -n \times \log \left(1 + \frac{C \times t}{k} \right) \quad (3)$$

onde N = número de organismos coliforme, no tempo final (NMP/100mL); N_0 = número de organismos coliforme, no tempo inicial (NMP/100mL); C = concentração de cloro residual ao final do tempo de contato t (mg/L); t = tempo de contato (min.); k = constante para microrganismos específicos sobre determinadas condições (adimensional); n = coeficiente de diluição (adimensional); m = constante taxa de reação (adimensional). As constantes e os coeficientes de todos os modelos foram obtidos a partir do processo de otimização, utilizando o método dos mínimos quadráticos e o algoritmo de otimização DEPS (Differential Evolution and Particle Swarm Optimization) disponível no Calc-Solver (planilha de cálculo do OpenOffice).

Abordagem dos custos

Com a finalidade de se realizar a abordagem de custo foi realizada a determinação de custos de implantação, de operação anual e do m³ de efluente tratado. Os custos de implantação e operação foram levantados através da consulta à empresa regional especializada na área de saneamento ambiental. No cálculo do custo do m³ de efluente tratado adotou-se o método empregado por Mierzwa *et al.* (2008),

$$C_{ET} = \frac{P \left[\frac{i \cdot (1+i)^{No.}}{(1+i)^{No.} - 1} \right] + O}{V} \quad (4)$$

onde C_{ET} = valor do metro cúbico de efluente tratado (R\$/m³); P = valor do investimento

(R\$); O = gasto anual com a operação do sistema (R\$); V = volume anual de água produzido (m³); i = taxa de retorno do investimento (% a.a./100); $No.$ = número de anos para o retorno do investimento (anos). A taxa de retorno do investimento refere-se à ata de reunião do COPOM de 09/12/2009, de 8,75 % a.a. (<http://www.bcb.gov.br/?COPOMJUROS>).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados da análise estatística descritiva dos dados obtidos durante o monitoramento do PSH. Em média pode-se afirmar que a qualidade do efluente atendeu aos padrões nacionais e internacionais (Tabela 1). Os resultados indicaram aumento nos valores de pH após o tratamento no PSH, possivelmente devido às características alcalinas do agente desinfetante. Os valores do coeficiente de variação encontrados para as variáveis de pH, DQO, DBO e SST no efluente (P2) foram superiores aos encontrados no afluente, indicando instabilidade na performance de tratamento.

A Figura 2 apresenta gráficos de barra com intervalo de confiança (I.C.) de 95 % para as variáveis de DQO, DBO e SST, em amostras de afluente (P1) e de efluente (P2). A observação dos pares formados pelas Figuras 2a-2b, 2c-2d e 2e-2f, permitiu a comparação do efluente em tratamento e tratado, informando a existência de diferenças importantes entre tendências de P1 e P2, bem com a eficácia do tratamento (reduções nas concentrações de DBO, DQO e SST). Em relação à eficiência de tratamento, Figuras 3a, 3b e 3c, observaram-se faixas de 54–83 %, 70–90 % e 51–92 %, para as variáveis de DQO, DBO e SST.

Na Tabela 4, estão apresentados alguns trabalhos previamente realizados com características similares. A eficiência da remoção de DQO não superou, somente, os resultados encontrados por Rodgers *et al.* (2005) e Healy *et al.* (2007). De acordo com a Tabela 4, à eficiência da remoção de DBO apresentou o melhor dos desempenhos, dentre os trabalhos previamente realizados. Quanto à eficiência na remoção de SST, os resultados superaram os encontrados por Jimenez *et al.* (2000) e Needer *et al.* (2000), e foram equiparáveis aos demais estudos apresentados. De modo geral, o desempenho do PSH na remoção das DQO, DBO e SST não foram distantes dos trabalhos previamente realizados.

Variável	Unidades	Nº de observações	Mín.	Máx.	Média	Desvio Padrão	CV (%)
TP (P1)	°C	16	26	33	28,9	2,40	8,32
TP (P2)	°C	16	26	32	29,0	1,50	5,19
pH (P1)		16	7,01	7,70	7,36	0,21	2,87
pH (P2)		16	7,24	8,19	7,58	0,24	3,24
DQO (P1)	mg/L	16	125	280	220	47,20	21,45
DQO (P2)	mg/L	16	42	107	66	18,01	27,24
DBO (P1)	mg/L	16	65	169	122	29,08	23,83
DBO (P2)	mg/L	16	12	39	22	7,19	32,31
SST (P1)	mg/L	16	79	190	127	37,24	29,26
SST (P2)	mg/L	16	10	50	29	11,09	37,74
C (P1)	mg/L	24 ⁽²⁾	0,0	0,0	0,0	0,0	(3)
C (P2)	mg/L	24 ⁽²⁾	2	24	8,6	3,81	44,50
CT (P1)	NMP/100mL	24 ⁽²⁾	9,9E+3	1,9E+6	4,7E+4 ⁽¹⁾	6,9E+5	1464
CT (P2)	NMP/100mL	24 ⁽²⁾	0,0E+0	1,3E+4	0,0E+0 ⁽¹⁾	2,6E+3	(3)

(1) média geométrica; (2) estudo do comportamento da CT frente a diversas concentrações de C; (3) não calculado devido à presença de elemento nulo; P1 afluente do PSH; P2 efluente do PSH

Tabela 3. Análise estatística descritiva e coeficiente de variação (CV)

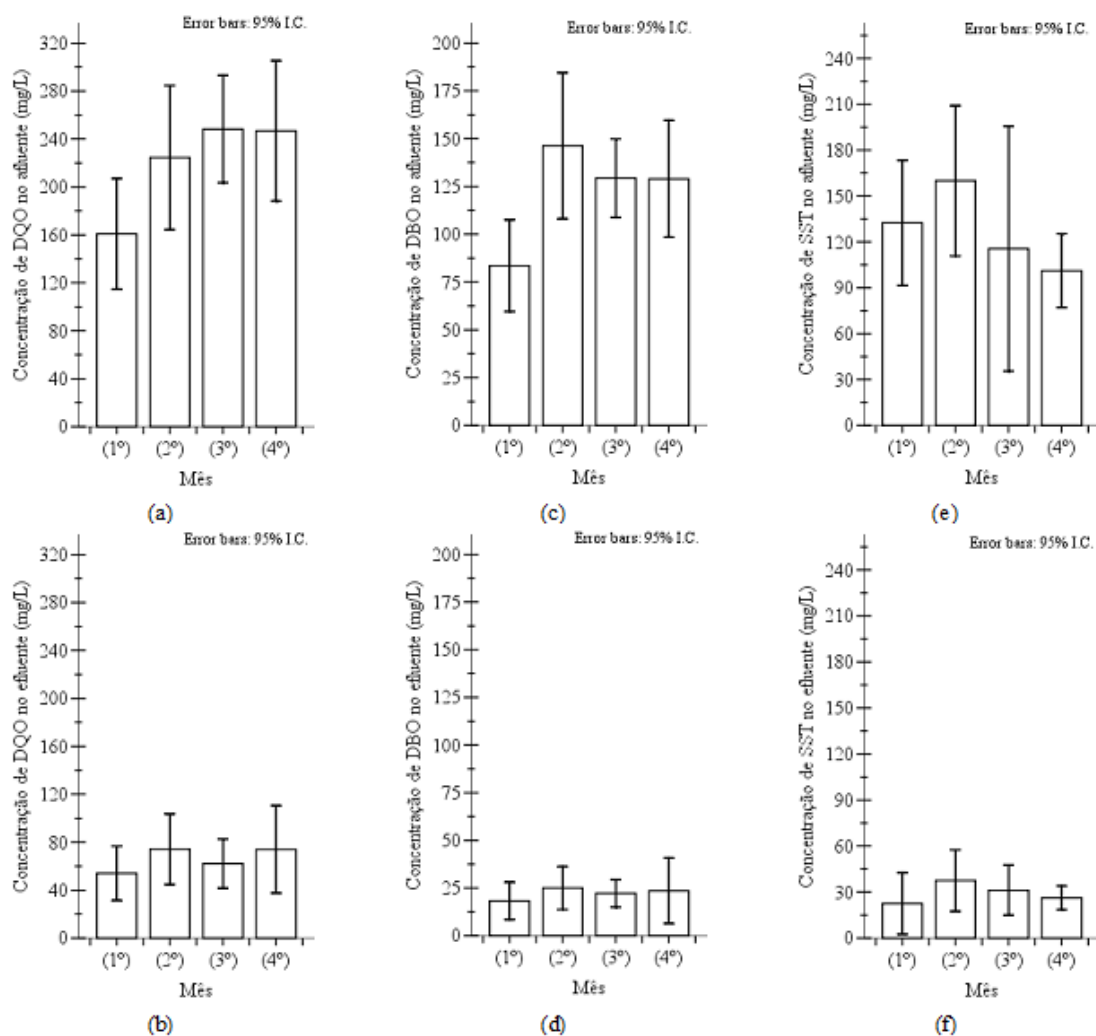


Figura 2. Representação gráfica das variáveis DQO, DBO e SST; (a), (c), (e) afluente; (b), (d), (e) efluente

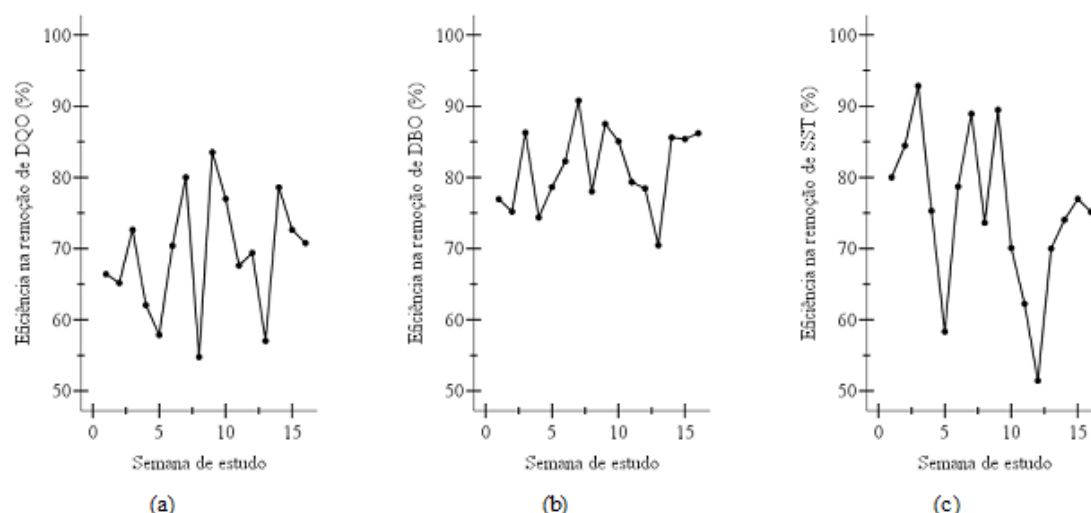


Figura 3. Representação gráfica da eficiência de remoção, série temporal; (a) DQO; (b) DBO; (c) SST

Referência	Tipo afluente	Leito filtrante	Regime de operação	Remoção DQO (%)	Remoção DBO (%)	Remoção SST (%)
Jimenez <i>et al.</i> (2000)	APT ⁽¹⁾	areia	contínuo	8	(n.a.)	39 – 47
Needer <i>et al.</i> (2000)	LP ⁽²⁾	pedra e areia	intermitente	(n.a.)	41 – 56	60 – 67
Sezerino <i>et al.</i> (2005)	LFA ⁽³⁾	brita	contínuo	56 – 73	(n.a.)	83 – 92
Souza <i>et al.</i> (2005)	RA ⁽⁴⁾	brita	contínuo	64	(n.a.)	85
Andrada <i>et al.</i> (2005)	LP ⁽²⁾	pedra	contínuo	46	37	73
Rodgers <i>et al.</i> (2005)	AGR ⁽⁵⁾	areia	intermitente	96	(n.a.)	100
Healy <i>et al.</i> (2007)	Sintético	areia	contínuo	99	(n.a.)	99

(1) tratamento primário avançado; (2) lagoa de polimento; (3) lagoa facultativa; (4) reator anaeróbio; (5) agricultura; (n.a.) não apresenta

Tabela 4. Trabalhos similares previamente realizados

Tem-se ainda como importante ponto da experimentação, a análise da eficiência do sistema de desinfecção, avaliada através do Fator $C \times t$, a temperatura ambiente ($29 \pm 1,5^\circ\text{C}$). O resultado ótimo na remoção de CT foram obtidos com Fator $C \times t$ de $25\text{mg/L} \times \text{min.}$, concentração de $8,0\text{mg/L}$ e tempo de contato de $3,1\text{min.}$, atingindo aproximadamente 100% de remoção de CT (Figura 4a).

O resultado foi próximo ao encontrado por Lapolli *et al.* (2005), quando do estudo de desinfecção de efluentes através de dióxido de cloro. Também, Tsai e Lin (1999), indicaram como valor ótimo do Fator $C \times t$ o valor de $10.000\text{mg/L} \times \text{min.}$, ao realizarem estudos voltados a desinfecção de efluente hospitalar. A justificativas para esta discrepância podem ser atribuídas às características físico-químico-biológicas do afluente a ser desinfetado, no caso do estudo de Tsai e Lin (1999), efluente hospi-

talar com alta concentração de DQO (3.080mg/L). Apesar da simplicidade do sistema de desinfecção, esse pôde atender a exigência extrema de ausência de CT, implicando no atendimento ao proposto pelo experimento, em termos de remoção de coliformes. Os estudos para avaliação da aderência dos modelos de desinfecção (Chick-Watson, Hom e Selleck) têm seus resultados apresentados nas Figuras 4b e 4c e nas Equações 5, 6 e 7. Os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram de 0,971 para Chick-Watson, 0,719 para Hom e 0,582 para Selleck

$$\log \frac{N}{N_0} = -0,0003 \times C^{4,0806} \times t \quad (5)$$

$$\log \frac{N}{N_0} = -0,3129 \times C^{0,7000} \times t^{0,6907} \quad (6)$$

$$\log \frac{N}{N_0} = -2,4167 \times \log \left(1 + \frac{C \times t}{2,2120} \right) \quad (7)$$

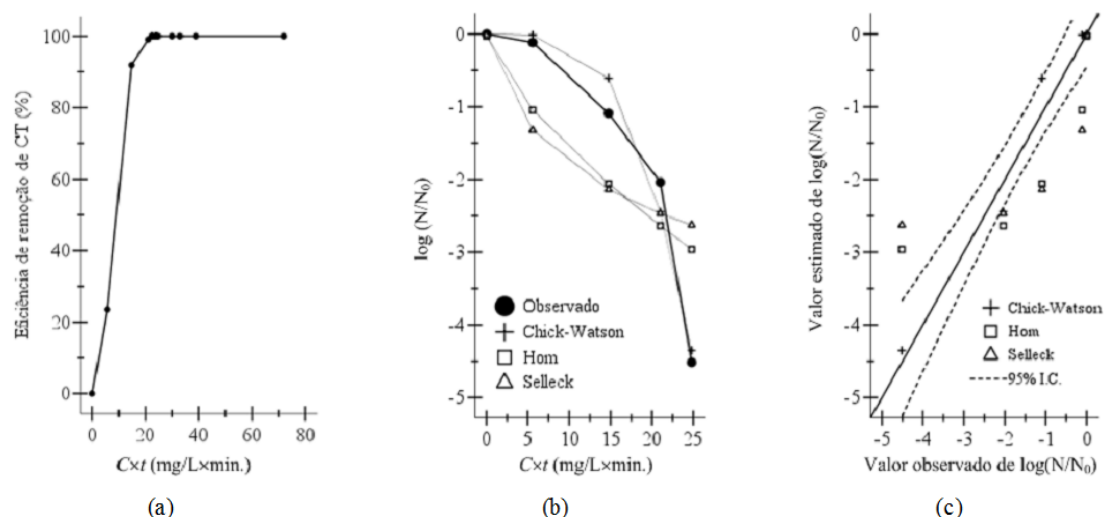


Figura 4. Representação gráfica; (a) eficiência da remoção CT *versus* Fator $C \times t$; (b) valores observados e estimados de $\log(N/N_0)$ *versus* Fator $C \times t$; (c) valores observados de $\log(N/N_0)$ *versus* estimados de $\log(N/N_0)$

1. Custos com materiais

Item	Descrição	Unidade	Quantidade	Preço unitário	Total parcial
1	Cimento	SC 50Kg	6	20	120,00
2	Areia	m	2	40	80,00
3	Cal	SC 40Kg	8	8	64,00
4	Britas	m	1,3	120	156,00
5	Ferragem tanque 5/16Ç/ 15 - comp. 12m	Barra	12	25	300,00
6	Tijolos cerâmicos 8 furos 1 vez	Peça	728	0,37	269,36
7	Tela eletro soldada 1/4"	m	6,4	25	160,00
8	Vigas de madeira - Comp. 210m (09 PÇ)	m	0,38	1450	551,00
9	Agregados do leito filtrante	m	6,4	60	384,00
10	Tubo 100mm PVC	Peça	6	35	210,00
11	Joelho 90 100mm	Peça	14	4,5	63,00
12	Válvula dosadora	Peça	1	20	20,00
13	Reservatório (dosador)	Peça	1	45	45,00
14	Indiretos	Conjunto	1	200	200,00
Total de materiais					2.622,36

2. Custos com mão-de-obra

Serviços	Total parcial
Construção de protótipo do sistema híbrido	3.000,00
Total (materiais + mão-de-obra + BDI 20%) (R\$)	6.746,83

BDI: Benefícios e Despesas Indiretas

Tabela 5. Custo de investimento para implantação

Os resultados indicaram como modelo de melhor adequação o modelo Chick-Watson, enquanto que os modelos Hom e Selleck indicaram alternância, com momentos de subestimação (Fator $C \times t < 20 \text{mg/L} \times \text{min.}$) e momentos de superestimação (Fator $C \times t > 20 \text{mg/L} \times \text{min.}$), Figura 4b. Também, uma relação linear entre os valores observados e estimados pelo modelo Chick-Watson foi observada, Figura 4c. Sugere-

se que o planejamento operacional e a elaboração de projetos considerem o modelo de desinfecção de Chick-Watson. A pequena quantidade de dados utilizados para otimização das constantes/coeficientes e a alteração das características físico-químico-biológicas, tornam necessários cuidados a utilização destes resultados. A abordagem de custos tem seus resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6.

1. Custos com pessoal				
Salários	Encargos sociais e trabalhistas	Total mensal	Total parcial	
700,00	126 %	1.582,00	18.984,00	
2. Despesas com produtos químicos				
Produto	Quantidade	Unidade	Preço unitário	Total parcial
Hipoclorito de sódio 10-12 %	279	60kg (bombona)	118,50	33.061,50
Kit para análise de cloro	15	Kit (para 100 testes)	53,00	795,00
3. Despesas com energia elétrica ⁽¹⁾				
Consumo	Preço do MWh	Total parcial		
0	384,43	0,00		
4. Despesas com manutenção				
Serviços				Total parcial
Reparo de vazamentos				1.200,00
Manutenção do leito filtrante (limpeza e substituição)				1.590,00
Serviços diversos				1.000,00
5. Total anual (R\$)				56.630,50

Fonte: ⁽¹⁾ Centrais Elétricas Matogrossenses (<http://www.gruporede.com.br/cemat/>)

Tabela 6. Custos de operação (anual)

Período de retorno - No. (anos)	1	5	10	15	20	25	30
Custo de tratamento - C_{ET} (R\$/m ³)	0,42	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,37

Tabela 7. Custos de tratamento do efluente em função do período de retorno

Foram considerados apenas os custos relacionados aos principais componentes do sistema. As estimativas de custos foram obtidas através de consulta à empresa Ambicon Engenharia de Saúde Pública ME, referente a janeiro de 2010. Com base na Eq.(4) e nos dados apresentados nas Tabelas 2, 5 e 6 foi obtida a estimativa dos custos de tratamento do efluente para o PSH. A Tabela 7 apresenta os custos de tratamento do efluente em função do período de retorno de investimento (1 a 30 anos).

Os resultados indicaram variação de 0,37–0,42R\$/m³, o que equivale a 0,20–0,22US\$/m³ (dólar dia 05/02/2010, 1US\$=1,8745R\$, <http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/batch/taxas.asp?id=txdolar&id=txdolar>), custos próximos ao encontrado por Nenov (1995) que encontrou valores variando de 0,14–0,21US\$/m³, ao estudar experimentos em escala laboratorial (colunas de sedimentação, tratamento físico-químico, lodos ativados e combinação entre os sistemas). Nour *et al.* (2007) encontrou custo de 6,39R\$/m⁻³ (valor estimado a partir da Eq.(4)) ao estudar tratamento de esgoto sanitário em pequenos núcleos habitacionais. Brostel *et al.* (2001) ao comparar o desempenho de estações de tratamento de esgo-

tos do Distrito Federal do Brasil encontrou valores variando de 0,69–15,77R\$/m³. Em termos econômicos, o PSH não apresentou significativas divergências entre os sistemas previamente estudados, podendo representar mais alternativa economicamente viável ao pós-tratamento de efluentes, merecendo maior quantidade de pesquisa.

CONCLUSÕES

Uma unidade piloto destinada à remoção de sólidos suspensos totais e coliformes termotolerantes foi desenvolvida adequadamente, porém, observou-se um pequeno período de monitoramento merecendo maior quantidade de pesquisa. A concepção de um filtro conjugado a um sistema de desinfecção apresentou-se como uma proposta viável ao pós-tratamento de efluentes de lagoas de estabilização. O desenvolvimento e avaliação do protótipo do sistema híbrido, confeccionadas a partir do emprego de materiais de fácil obtenção e baixo custo, revelou bons resultados em termos de remoção de DQO, DBO e sólidos em suspensão totais, com eficiência variando de 54–83 %, 70–90 % e 51–92 %, respectivamente. O afluente apresentou remoção total

de coliforme termotolerante com Fator $C \times t$ de $25\text{mg.L}^{-1} \times \text{min.}$, a temperatura ambiente de $29 \pm 1,5^\circ\text{C}$. É importante colocar que a continuidade deste estudo considerando a determinação do tempo de carreira e a seleção do melhor sistema e parâmetros de lavagem trata-se de importantes itens antes da implementação em escala plena desta unidade tratadora. Observou-se ainda a descarga de material orgânico retido no leito filtrante, apenas de forma visual (observação de emissões pontuais de plumas de flocos de material orgânico na superfície do leito filtrante). Reforçando a necessidade de estudos e/ou implementação de sistemas de lavagem do leito filtrante e a determinação de tempos de carreira ideal.

AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil, pelo apoio durante a realização deste trabalho.

LISTA DE SIMBOLOS

AGR: Agricultura
APT: Tratamento primário avançado
 $C \times t$: Fator concentração \times tempo de contato ($\text{mg/L} \times \text{min}$)
CA1: Camada filtrante 1, tipo brita n. 2
CA2: Camada filtrante 2, tipo pedrisco
CA3: Camada filtrante 3, tipo areia
CEE: Comissão das Comunidades Europeias
C_{ET}: Valor do metro cúbico de efluente tratado ($\text{R\$/m}^3$)
C: Cloro residual livre (mg/L)
CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente
CS: Camada suporte, tipo brita n. 5
CT: Coliformes termotolerantes ($\text{NMP}/100 \text{ mL}$)
CV: Coeficiente de variação (%)
DBO: DBO_5 (mg/L)
DQO: DQO (mg/L)
I: Taxa de retorno do investimento (% a.a./100)
k, n, m: Constante/coeficientes dos modelos de desinfecção
LFA: Lagoa facultativa
LP: Lagoa de polimento
No.: Número de anos para o retorno do investimento (anos)
O: Gasto anual com a operação do sistema ($\text{R\$/}$)
OMS: Organização Mundial da Saúde
P: Valor do investimento ($\text{R\$/}$)
P1: Ponto de amostragem de afluente ao PSH (entrada)

P2: Ponto de amostragem de efluente ao PSH (saída)

pH: Potencial hidrogeniônico

PSH: Protótipo do sistema híbrido

Q: Vazão afluente (m^3/h)

RA: Reator anaeróbio

SST: Sólidos em suspensão totais (mg/L)

t: Tempo de contato (min.)

TF: Taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2 \times \text{d}$)

THA: Taxa hidráulica aplica ($\text{m}^3/\text{m}^3 \times \text{d1}$)

TOD: Tempo de operação diário (h/d)

TP: Temperatura ($^\circ\text{C}$)

V: Volume anual de água produzido (m^3)

REFERÊNCIAS

- Andrada, J.G.B., Santos, P.S. e Von Sperling, M., (2005). Tratamento de esgoto simplificado, possibilitando o atendimento a diversos critérios para reuso. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 9 (4), 112–117.
- Araújo, G.M., Oliveira, E.C.A., Ingunza, M.P.D., Calazans, M.A.D. e Araújo, A.L.C., (2005). Avaliação da utilização de filtros anaeróbios simplificados, na remoção de algas de efluentes de lagoas de estabilização. Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, Brasil. Cd-rom.
- ABNT, (1992). ABNT–NBR 12216 Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AWWA-APHA-WEF, (1995). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Edition, Washington, D.C.
- Braile, P.M. e Cavalcanti, J.E.W.A., (1993). Manual de tratamento de águas residuárias industriais. CETESB, São Paulo.
- Brostel, R.C., Neder, K.D. e Souza, M.A.A., (2001). Análise comparativa do desempenho de estações de tratamento de esgotos do Distrito Federal. Anais do XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, Brasil. Cd-rom.
- Bussab, W.O. e Morettin, P.A., (2006). Estatística básica. 5 Edição, Saraiva, São Paulo.
- CEE, (1991). Directiva do Conselho No. 91/271/CEE de 21/05/1991. Disponível

- em: <http://siddamb.apambiente.pt/default.asp> (acesso em: 11 Setembro 2010).
- CONAMA, (2005). Resolução CONAMA No. 357, de 17/03/2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf> (acesso em: 11 Setembro 2010).
- CUIABÁ, (2007). Perfil Socioeconômico de Cuiabá. Vol. III, Central de Texto, Cuiabá, Brasil.
- Daniel, L.A., Brandão, C.C.S., Guimarães, J.R., Libânio, M. e Luca, S.J.D., (2001). Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável. PROSAB, São Carlos, Brasil. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/prosab/livros/LuizDaniel.pdf> (acesso em: 05 Agosto 2008).
- Healy, M.G., Rodgers, M. e Mulqueen, J., (2007). Performance of a stratified sand filter in removal of chemical oxygen demand, total suspended solids and ammonia nitrogen from high-strength wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 83, 409–415.
- Jimenez, B., Chavez, A., Leyva, A. e Tchobanoglou, G., (2000). Sand and synthetic medium filtration of advanced primary treatment effluent from Mexico city. *Water Research*, 34 (2), 473–480.
- Kitis, M., (2004). Disinfection of wastewater with peracetic acid: a review. *Elsevier Environment International*, Vol. 30, pp. 47–55.
- Lapolli, F.R., Hassemer, M.E.N., Camargo, J.G., Damásio, D.L. e Lobo-Recio, M.A., (2005). Desinfecção de efluentes sanitários através de dióxido de cloro. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 10 (3), 200–208.
- Lee, Y-J. e Nan, S-H., (2002). Reflection on kinetic models to the chlorine disinfection for drinking water production. *Journal of Microbiology*, 40, 119–124.
- Metcalf & Eddy, (1995). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. McGraw-Hill, International Edition, ISBN:0-07-100824-1.
- Mierzwa, J.C., Silva, M.C.C., Rodrigues, L.D.B. e Hespanhol, I., (2008). Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: Avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 13 (1), 78–87.
- Neder, K.D., Queiroz, T.R. e Souza, M.A.A. (2000). Remoção de sólidos suspensos de efluentes de lagoas de estabilização por meio de processos naturais. *Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Porto Alegre, Brasil. Disponível em: http://www.ciplima.org.pe/sanitaria/xxvii_con/tema01/i-091.pdf (acesso em: 25 fevereiro 2008).
- Nenov, J., (1995). TSS/BOD removal efficiency and cost comparison of chemical and biological wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 32 (7), 207–214.
- Nour, E.A.A., Camargo, S.A.R., Roston, D.M., Paterniani, J.E.S. e Teixeira-Filho, J., (2007). Sistema integrado simplificado de tratamento de esgoto sanitário em pequenos núcleos habitacionais: custo de implantação e operação. *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Belo Horizonte, Brasil. Cd-rom.
- Palacios, G.L. e Timmons, M.B., (2001). Determining design parameters for recovery of aquaculture wastewater using sand beds. *Aquacultural Engineering*, 24, 289–299.
- Rodgers, M., Healy, M.G. e Mulqueen, J., (2005). Organic carbon removal and nitrification of high strength wastewaters using stratified sand filters. *Water Research*, 39, 3279–3286.
- Sezerino, B.H., Gotardo, J.T., Muraoca, R., Philippi, L.S. e Lapolli, F.R., (2005). Filtro de pedra como pós-tratamento de efluente de lagoa de estabilização. *Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Campo Grande, Brasil. Cd-rom.
- Souza, J.T., Van Haandel, A.C., Cavalcanti, P.F.F. e Figueiredo, A.M.F., (2005). Tratamento de esgoto para uso na agricultura do semi-árido nordestino. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 10 (3), 260–265.

- Tsai, C-T. e Lin, S-T., (1999). Disinfection hospital waste sludge using hypochlorite and chlorine dioxide. *Journal of Applied Microbiology*, 86, 827-833.
- Van Cuyk, S., Siegrist, R., Logan, A., Masson, S., Fischer, E., Cecchini, G. e Figueroa, L., (2001). Hydraulic and purification behaviors and their interactions during wastewater treatment in soil infiltration systems. *Water Research*, 35 (4), 953–964.
- Veschetti, E., Cutilli, D., Bonadonna, L., Briancesso, R., Martini, C., Cecchini, G., Anastasi, P. e Ottaviani, M., (2003). Pilot-plant comparative study of peracetic acid and sodium hypochlorite wastewater disinfection. *Water Research*, 37, 78–94.
- Von Sperling, M., (1996). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2a. Edição, DESA/UFMG, Belo Horizonte, Brasil.
- OMS, (2006). WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: Policy and regulatory aspects. Vol. 1. Disponível em: http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gsuww/en/index.html (acesso em: 11 Setembro 2010).