

MODELAGEM DA REMOÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS POR BARREIRAS FLUTUANTES EM RESERVATÓRIOS DE ÁGUA

Eduardo Paniguel Oliveira^{1}; Rafael de Oliveira Tiezzi²; Rafael de Brito Moura³; Caio Pompeu Cavalhieri⁴; João Vitor Rodriguez de Souza⁵; Ana Maria Schuffner⁶; Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes⁷ & Alexandre Silveira⁸*

Resumo – Cortinas ou barreiras de redução de turbidez foram idealizadas para conter plumas de sólidos suspensos em corpos d'água. Águas com elevada turbidez inviabilizam o seu uso direto, aumentando o custo do tratamento de água e gestão do lodo gerado. Com a finalidade de reduzir a turbidez no manancial, o presente estudo realizou um planejamento experimental estatístico baseado no modelo de delineamento composto central rotacional (DCCR) para um conjunto de 2 barreiras flutuantes em sequência. O experimento foi realizado em escala laboratorial, utilizando de um canal de acrílico. Os fatores analisados foram a gramatura da primeira barreira, a gramatura da segunda barreira e a taxa de aplicação. A eficiência total do sistema foi superior a 92% em 17 dos 18 ensaios realizados.

Palavras-Chave – Barreira flutuante, cortina de turbidez, geotêxtil.

MODELING OF SUSPENDED SOLIDS REMOVAL FOR FLOATING TURBIDITY BARRIERS IN WATER RESERVOIRS

Abstract – Floating turbidity curtains or barriers were idealized to contain turbidity plumes in water bodies. The presence of high turbidity in the raw water makes its direct use impractical, creating the necessity of a high cost water treatment and a serious sludge management. With the purpose of reducing the turbidity in the source, this study used a statistic experimental planning based on the central composite rotational design (CCDR) to evaluate the use of 2 turbidity barriers in sequence. The experiment was done in laboratorial scale, using an acrylic channel. The factors analyzed were grammage of the first and second barrier and the application rate. The system efficiency for mass retention was above 92% for 17 of the 18 carried through assays.

Keywords – Floating barriers, turbidity curtain, geotextile.

INTRODUÇÃO

De acordo com Cabral *et al.* (2016), um dos fatores de maior influência na geração de lodo em uma estação de tratamento de água (ETA) são os sólidos em suspensão presentes na água captada. O solo, despreendido pela ação de chuvas em ambientes naturalmente descampados ou degradados, acaba sendo carregado para os mananciais superficiais, elevando-se a concentração de

¹ Mestrando na Universidade Federal de Alfenas, du.paniguel@gmail.com.

² Professor Doutor na Universidade Federal de Alfenas, rafael.tiezzi@unifal-mg.edu.br

³ Professor Doutor na Universidade Federal de Alfenas, rafael.moura@unifal-mg.edu.br

⁴ Doutorando na Universidade de São Paulo e Pesquisador no Centro de Tecnologias Geoambientais, caiopc@ipt.br

⁵ Graduando em Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Alfenas, jsouza.rois@gmail.com

⁶ Graduanda em Ciência e Tecnologia na Universidade Federal de Alfenas, anamschuffner@gmail.com

⁷ Professor Doutor na Universidade Federal de Alfenas, paulo.menezes@unifal-mg.edu.br

⁸ Professor Doutor na Universidade Federal de Alfenas, alexandre.silveira@unifal-mg.edu.br

sólidos em suspensão e por consequência a turbidez, um dos resultados mais visíveis da erosão (Lepsh, 2011).

O controle dos efeitos adversos causados pela ação das chuvas no recurso hídrico está na redução do processo erosivo nas vertentes da bacia, no entanto para tal, seria necessário ações e aplicações de recursos na conservação do solo ou na manutenção e recuperação da cobertura nativa. Dentro da realidade brasileira esses tipos de ações protetivas estão longe de ser uma prioridade entre os gestores dos recursos hídricos, sendo o principal motivo a inexistência de mecanismos eficazes que demonstrem a viabilidade econômica e social para este tipo de investimento.

Para problemas associados ao transporte de sedimentos em corpos hídricos, há uma forma de controle com o emprego de cortinas de redução de turbidez, também chamadas de barreiras flutuantes. Tal método está presente na literatura de forma mais intensa a partir da década de 90 e pode ser encontrado, como exemplo, no *Alabama Handbook for Erosion Control, Sediment Control and Stormwater Management on Construction Site and Urban Areas* (2003). A simplicidade do processo de aplicação e a baixa necessidade de manutenção despertam o interesse para o uso desta prática, como foi utilizado nas obras do trecho Sul do rodovial, Região Metropolitana de São Paulo (IPT, 2008). O método de barreiras flutuantes mostra-se eficiente em sua aplicação, porém há poucos estudos que quantifiquem a redução de turbidez ou sólidos suspensos a partir deste método (Gaiotte *et al.*, 2015).

As ETA convencionais possuem na etapa inicial do processo a aplicação de coagulante. A quantidade de coagulante aplicado (sulfato de alumínio em geral) é determinada pelas características do material suspenso e principalmente pela concentração do mesmo (Kawamura, 2000). Os sólidos suspensos depois de agregados pelo coagulante são retirados do sistema por etapas de decantação e filtração na forma de lodo. O tratamento de lodo eleva muito os custos envolvidos nos processos de destinação final, fazendo com que a maioria dos sistemas de tratamento de água acabem dispendo o lodo no ambiente, frequentemente é observado o descarte no corpo hídrico mais próximo, provocando impactos ambientais negativos.

De acordo com a NBR 10.004 o lodo gerado na ETA é classificado como resíduo sólido, podendo ainda, ser classificado como resíduo sólido industrial quando atinge o limite máximo de concentração de 0,2mg/L de alumínio no extrato, não sendo permitido o lançamento do lodo in natura nos corpos hídricos. O desrespeito à legislação faz com que mananciais superficiais tenham sua qualidade comprometida devido ao lançamento destes resíduos. Saneas (2009) mostra que em grandes centros urbanos essa prática tem aumentado a quantidades de sólidos e consequentemente a turbidez em corpos d'água, bem como a sua toxicidade. Essa prática danosa, pode comprometer de forma grave os ecossistemas aquáticos. Entre as modificações encontradas nos ecossistemas destacam-se: o assoreamento dos corpos hídricos; a alteração da qualidade da água; aumento da concentração de metais e de sólidos; e o risco de dispersão de organismos patogênicos, de acordo com Silva (2008) e Burgos *et al.* (2014).

Antes de pensar na remediação ou na destinação final dos resíduos gerados, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal 12.305/2010) prioriza a medida de não geração dos mesmos. Com isso, o presente trabalho tem como finalidade avaliar o desempenho de diferentes barreiras modelando a redução de sólidos suspensos, refletindo no aumento da qualidade da água, diminuindo a quantidade de lodo gerada e reduzindo gastos com insumos químicos nas ETA.

METODOLOGIA

Canal

O experimento foi realizado em um canal de acrílico com dimensões de 1,36 x 0,28 x 0,20 metros - comprimento útil x largura útil x altura da lâmina no vertedouro - respectivamente, totalizando um volume útil próximo a 80 litros (Figura 1). O canal foi alocado de forma a ter declividade igual a 0,0015m/m.

Afluente

Como fonte de sedimento foi utilizado o solo local, moído e peneirado com granulometria menor que 75 μm . Esta granulometria foi escolhida pois as menores granulometrias de sedimento são as que se encontram em suspensão por maior tempo no meio ambiente (Perkins *et al.*, 2007).

O afluente foi dividido em duas entradas, uma de água limpa e uma com água+sedimento preparado. A entrada de sedimento foi dosada por uma bomba elétrica peristáltica, ajustada para uma vazão de 1,2 Litros/minuto. A bomba de água limpa, de 1CV, foi controlada através da leitura de um rotâmetro e por uma válvula gaveta, completando o restante da vazão necessária para cada ensaio. A Figura 1 apresenta o aparato experimental.

Foram calculadas e determinadas as vazões e a concentração necessária de sedimento para atingir inicialmente uma mistura teórica na entrada do canal de 1 grama por litro. Porém, sabe-se que ocorrem perdas pela sedimentação na mangueira de alimentação e em menor quantidade no volume morto (2L aproximadamente) restante no reservatório que abastece a bomba peristáltica, dessa forma a concentração real que entra no canal foi calculada pelas equações 1 e 2.

A massa retida na mangueira foi obtida com a lavagem da mangueira através da passagem sob pressão da água. O material recolhido foi seco em estufa e pesado. A massa do reservatório foi coletada, seca em estufa e pesada.

$$m_{real} = m_{pesada} - m_{mangueira} - m_{reservatório} \quad (1)$$

$$C_{real} = \frac{m_{real}}{V_{\text{água}} + V_{\text{afluente}}} \quad (2)$$

Onde: m_{real} é a massa que entrou no canal; m_{pesada} é a massa teórica pesada; $m_{mangueira}$ é a massa sedimentada na mangueira; $m_{reservatório}$ é a massa que permaneceu no reservatório; C_{real} é a concentração real de sólidos em gramas/Litro; $V_{\text{água}}$ é o volume total utilizado de água e V_{afluente} é o volume total utilizado do afluente (água+sedimento).

Barreiras flutuantes

Para cada ensaio foram utilizadas duas barreiras de geotêxtil com distância de aproximadamente 0,48m, alocadas dentro do canal com o auxílio de uma moldura de acrílico de forma a preencher toda a secção molhada, possuindo uma área aproximadamente de 0,061m². O canal e a disposição das barreiras também podem ser vista na Figura 1.

As mantas geotêxteis utilizadas são do tipo não tecida de filamento contínuo. A gramatura utilizada variou de 130 e 500g/m². As mantas geotêxteis possuem permeabilidade entre 0,37 e 0,40cm/s (ABNT NBR 15223) e capacidade de fluxo de água entre 2340 e 7450L/min.m². As mantas geotêxteis foram cortadas, secas em estufa a 100°C, pesadas e nomeadas antes de serem fixadas no suporte.

Análise do balanço de massa

Após o término de cada ensaio, o sistema ficou em repouso até que ocorresse a sedimentação dos sólidos em suspensão. Após um dia em repouso já era observável a completa sedimentação. Depois da sedimentação era feito o esvaziamento do canal de forma lenta. Com o canal vazio, as cortinas eram retiradas do suporte e secas em estufa novamente antes da pesagem. A diferença de massa indica a quantidade de material que ficou retida em cada barreira (equação 3).

A massa do material sedimentado também foi coletada, conseguindo assim, determinar o total de massa retido pelo sistema (equação 4). A porcentagem das massas retida nas barreiras, sedimentada e a total retida pelo sistema foram feitas com relação a massa real que entrou no sistema, como mostra a equação 5.

$$m_{\text{barreira}} = m_{\text{usada}} - m_{\text{nova}} \quad (3)$$

$$m_{\text{retenção-sistema}} = m_{\text{barreira-1}} + m_{\text{barreira-2}} + m_{\text{sedimentado}} \quad (4)$$

$$\%m_i = \frac{m_i}{m_{\text{real}}} \quad (5)$$

Onde: m_{barreira} é a massa em gramas retida de sólidos em cada barreira; $m_{\text{retenção-sistema}}$ é a somatória das massas retidas nas barreiras e a massa sedimentada; $\%m_i$ é a porcentagem da massa (i = retida nas barreiras, sedimentada e retenção-sistema).

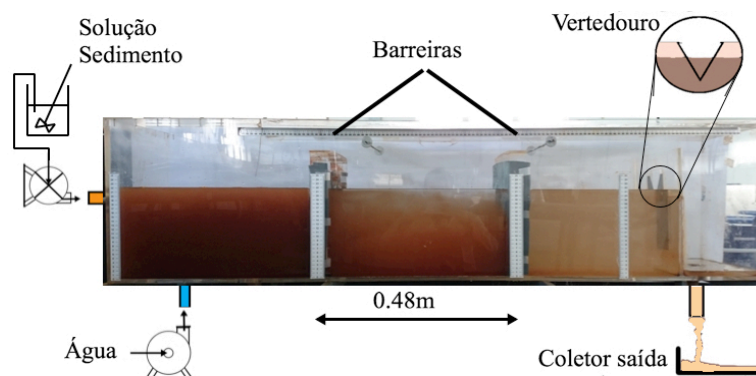


Figura 1 – Representação do canal utilizado com a indicação das barreiras e as bombas do sistema.

Planejamento experimental

A modelagem estatística para a eficiência total do sistema (y_1) foi realizada avaliando três fatores, ou seja, as variáveis independentes: a gramatura da 1ª barreira (x_1), a gramatura da 2ª barreira (x_2) e a taxa de aplicação do afluente (x_3).

Para avaliar o efeito dos fatores sobre as respostas, foi utilizado o delineamento composto central rotacional (DCCR), de acordo com o método estatístico de Rodriguez e Iemma (2014).

Foram realizados um total de 18 ensaios, feitos de forma aleatória. Deste total, foram realizados 8 nos níveis +1 e -1, 6 ensaios nos pontos axiais níveis -1.7 e +2 e 4 repetições no ponto central. O delineamento pode ser visto na Tabela 1.

Procedimento do ensaio

No início de cada ensaio o canal foi preenchido com água limpa, as barreiras eram alocadas e então ligava-se a bomba peristáltica para a alimentação da solução de sedimento e a bomba centrífuga para a alimentação de água limpa.

Cada conjunto de barreiras foi avaliado durante 3 horas, a vazão de água limpa foi ajustada através de uma válvula gaveta e a partir da leitura de um rotâmetro, instalado em série, mantendo-se a mesma vazão durante todo o ensaio.

Após o término, o sistema ficava em repouso durante no mínimo 1 dia para ocorrer a sedimentação da massa suspensa. O esvaziamento do canal era feito de forma lenta a partir de uma válvula. As barreiras eram retiradas do suporte de acrílico e secas em estufa e o material sedimentado era coletado, seco e pesado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Balanco de massa

A partir da metodologia adotada, calculou-se a massa real e a concentração de entrada de sedimento considerando a mistura completa da solução de sedimento com a água limpa.

O valor médio das 18 concentrações de sedimento foi de $0.91 \pm 0.02 \text{g/L}$, sendo o erro dado pelo desvio padrão. Os valores consistentes e o baixo erro garantem que os ensaios foram submetidos a uma concentração muito próxima. Apesar de uma mesma concentração para todos os 18 ensaios, deve-se notar que com a variação da taxa de aplicação alterou-se também a carga aplicada. Entre os ensaios realizados, os pontos extremos (ensaios 13 e 14), foram submetidos a uma massa real respectivamente de 270.76g e 584.86g, que refletem em 90,2g/hora e 194,9g/hora.

A partir do delineamento experimental DCCR realizado, obteve-se as respostas para y_1 , apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Planejamento experimental realizado (DCCR) e os valores da resposta analisada.

nº Ensaio	Fatores						Massa real (g)	Resposta
	Gramatura 1ª Barreira (g/m2)		Gramatura 2ª Barreira (g/m2)		Taxa de Aplicação (L/min)			Eficiência do Sistema (%)
	x1		x2		x2			y1
1	200	(-1)	200	(-1)	32.8	(-1)	310.98	99.2%
2	400	(1)	200	(-1)	32.8	(-1)	319.74	97.5%
3	200	(-1)	400	(1)	32.8	(-1)	324.60	98.2%
4	400	(1)	400	(1)	32.8	(-1)	315.20	98.9%
5	200	(-1)	200	(-1)	49.2	(1)	500.36	94.6%
6	400	(1)	200	(-1)	49.2	(1)	489.10	92.5%
7	200	(-1)	400	(1)	49.2	(1)	501.09	94.9%
8	400	(1)	400	(1)	49.2	(1)	487.02	96.0%
9	130	(-1.7)	300	(0)	41.0	(0)	386.85	96.1%
10	500	(2)	300	(0)	41.0	(0)	414.08	97.6%
11	300	(0)	130	(-1.7)	41.0	(0)	414.63	92.1%
12	300	(0)	500	(2)	41.0	(0)	411.31	94.3%
13	300	(0)	300	(0)	27.0	(-1.7)	270.76	99.6%
14	300	(0)	300	(0)	57.4	(2)	584.86	73.8%
15	300	(0)	300	(0)	41.0	(0)	418.02	97.1%
16	300	(0)	300	(0)	41.0	(0)	407.95	95.7%
17	300	(0)	300	(0)	41.0	(0)	418.96	94.8%
18	300	(0)	300	(0)	41.0	(0)	416.35	94.2%

Sedimentação e Eficiência total de remoção do sistema

A massa sedimentada foi quantificada com o recolhimento do canal inteiro, não havendo separação entre o que sedimentou antes da primeira ou antes da segunda barreira. Apesar de não quantificada através da medição da massa, é possível afirmar que sedimentação é maior antes da primeira barreira. Tal afirmação foi feita com a análise da altura da camada sedimentada, que apesar de possuir poucos milímetros de altura, apresentou diferenças em todos os 18 ensaios realizados. O maior acúmulo de massa antes da primeira barreira, poder ser verificado na Figura 2.

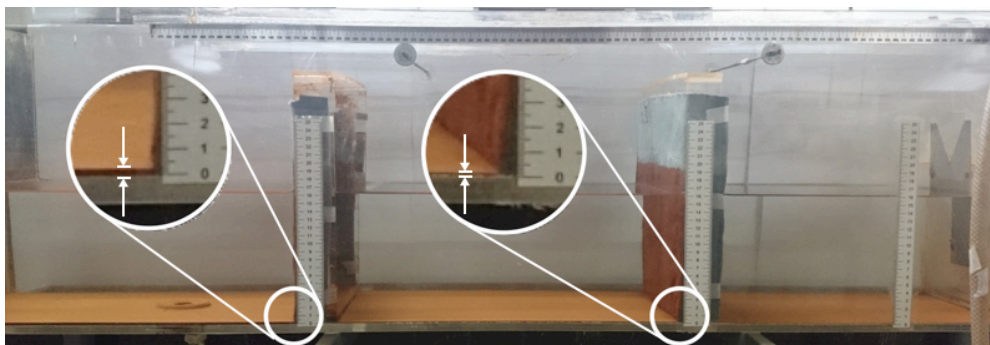


Figura 2 – Imagem durante o processo de esvaziamento do canal, observar a diferença de altura do material sedimentado ao fundo do canal (zoom antes da 1ª barreira e 2ª barreira).

Na Tabela 2 estão apresentados os coeficientes do modelo obtido através da regressão, a falta de ajuste e o R^2 para a eficiência do sistema (y_1). Os coeficientes que apresentaram p-valor acima do nível de significância (α) não foram inseridos na tabela.

Tabela 2. Coeficientes e p-valores dos parâmetros do modelo para a eficiência total de remoção do sistema.

Parâmetros	Y1 ($\alpha=5\%$)	
	Coeficiente	p-valor
x_1	Não significativo	
x_1^2	Não significativo	
x_2	Não significativo	
x_2^2	Não significativo	
x_3	-4.34	0.0007
x_3^2	-2.43	0.0310
x_1x_2	Não significativo	
x_1x_3	Não significativo	
x_2x_3	Não significativo	
Regressão	0.00081	
Falta de ajuste	0.03468	
R^2	61.31%	

A regressão realizada para a resposta de eficiência de remoção do sistema (y_1) apresentou como parâmetros significantes os fatores x_3 e x_3^2 , referentes a taxa de aplicação. O modelo obtido apresentou p-valor menor que 0.05 (confiança de 95%), porém houve estatisticamente a aceitação da condição de falta de ajuste. Por outro lado, o R^2 apresentou valor de 61.31% e a regressão apresentou um valor de 0.00081, muito menor que o 0.05. O modelo obtido está apresentado na equação 6.

$$y_1 = -4.34x_3 - 2.43x_3^2 \quad (6)$$

No geral, a partir da análise da Tabela 1 apresentada, todos os ensaios obtiveram eficiência de retenção superior a 92%, com exceção apenas do ensaio 14 (ponto crítico superior para a taxa de aplicação = 57.4 L/min.m^2), que apresentou eficiência de 73.8%. É possível afirmar que a maior parte da retenção do sistema ocorre devido ao favorecimento da sedimentação no canal, que obteve média de $77.7 \pm 4.6\%$, erro dado pelo desvio padrão dos 18 ensaios.

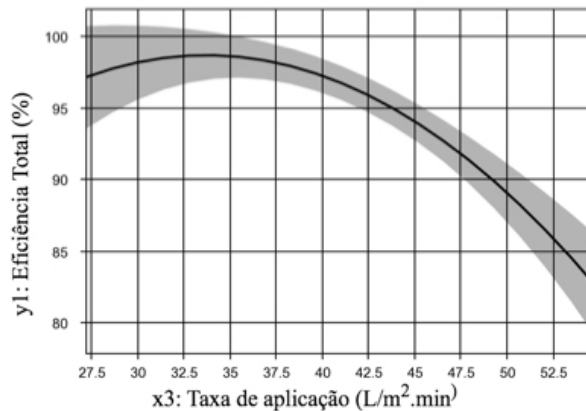


Figura 3 – Curva resposta obtida para a eficiência do sistema.

Observando a

Figura 3, tem-se que a eficiência do sistema é maior quando a taxa de aplicação é menor, obtendo eficiência maior que 90% para taxas menores que $50 \text{ L/m}^2.\text{min}$ aproximadamente. Sendo assim, para taxas muito elevadas a eficiência de remoção do sistema pode diminuir drasticamente.

Para aplicação desta tecnologia em reservatórios de captação de água, tem-se a hipótese que ela funcionaria de forma adequada em condições normais e também quando há picos de sólidos suspensos (piores situações). Os picos naturais de concentrações de sólidos suspensos estão relacionados com fortes eventos de precipitação. Neste caso, com o evento de chuvas, o nível da lâmina d'água no reservatório tende a aumentar, porém a vazão de captação continua a mesma, diminuindo assim, a taxa de aplicação sob as barreiras. Desta forma, o efeito negativo de elevada concentração de sólidos suspensos acaba sendo amenizado pela menor taxa de aplicação, favorecendo a eficiência de remoção do sistema. Em condições normais, a concentração de sólidos suspensos tende a ser menor e o sistema auxiliaria no processo de sedimentação destas partículas antes da captação. Além disso, mesmo que em situações extremas de taxas de aplicação, sabe-se que qualquer remoção realizada antes do processo de captação reflete em um efeito positivo na ETA, diminuindo gastos com coagulantes e diminuindo o lodo gerado.

CONCLUSÃO

A partir do experimento realizado em escala laboratorial é possível afirmar que o planejamento experimental possibilitou a regressão múltipla, a realização da análise estatística proposta e a geração do modelo de remoção de sólidos suspensos pelo método proposto. De modo geral a utilização de barreiras flutuantes apresentou um grande potencial para a redução de sólidos suspensos menores que $75 \mu\text{m}$, nas faixas de taxa e gramaturas estudadas no intervalo de tempo de 3 horas. Em específico conclui-se que:

1. A utilização de duas barreiras em sequência mostrou-se eficiente na remoção de sólidos suspensos, promovendo a retenção de material nas próprias barreiras e principalmente auxiliando na sedimentação do material suspenso.

2. O modelo gerado para a eficiência de remoção do sistema mostrou ser influenciada de forma quadrática pela taxa de aplicação do sistema, apresentando valores acima de 90% para taxas menores que 50L/min.m².
3. Os resultados demonstram que a ação da segunda barreira manteve a eficiência de remoção alta mesmo quando a primeira barreira foi submetida a ensaios de estresses (pontos críticos). Tal resultado sugere que o mesmo possa ocorrer para sequências de três ou mais barreiras, tornando-se sistemas mais robustos.
4. O método apresenta grande potencial para a diminuição de sólidos suspensos que chegam a captação em reservatórios de água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação do Instituto de Pesquisa Tecnológica (FIPT/IPT) pelo fomento e a Universidade Federal de Alfenas, UNIFL-MG, (Campus Poços de Caldas) pela estrutura e subsídio oferecido ao projeto.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 10004/2004 Classificação de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

ALABAMA SOIL AND WATER CONSERVATION COMMITTEE. *Alabama Handbook for Erosion Control, Sediment Control and Stormwater Management on Construction Sites and Urban Areas: Developing Plans and Designing Best Management Practices*. 4. ed. Montgomery, Alabama, 2003. 2 v.

BRASIL. *Lei N° 12.305, de 2 de Agosto de 2010*. Brasília, Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em: 16 jan. 2017.

BURGOS, Tatiane das Neves et al. Resíduos de estações de tratamento de água: avaliação dos riscos potenciais ambientais e para saúde. *Arquivos de Ciência e Saúde*, São José do Rio Preto, v. 2, n. 21, pp. 89-96, abr. 2014.

CABRAL, V. A. L.; VIANA, D. B.; BASTOS, R. K. X. Dimensionamento de leitos de secagem de lodo de estações de tratamento de água com emprego de modelos probabilísticos. *Revista Dae*, v. 64, n. 203, pp. 26-47, 2016. Editora Cubo Multimídia.

GAIOTTE, J. V. M.; TIEZZI, R. O.; CAVALHIERI, C. P.; MOURA, R. B.; SARDINHA, D. S. Metodologia de avaliação preliminar do desempenho de barreiras flutuantes para uso como proteção de captações em mananciais de água superficial. *28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Rio de Janeiro, Out. 2015.

PERKINS, MaryGail et al. Particle characterization and settling velocities for a water supply reservoir during a turbidity event. *Journal of Environmental Engineering*, v. 8, n. 133, p. 800-808, 2007.

SANEAS. 2009. Lodo: Um ponto de alerta no universo do Saneamento. *Revista Saneas*, v. 32, pp. 2-12, 2009.

SILVA, A. M. *Avaliação da qualidade do rio São Lourenço, SP, sob influência de estações de tratamento de água e estações de tratamento de esgoto*. 2008. 157 pp. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.