

## **II-362 - DESEMPENHO DE REATOR MICROAERÓBIO SUBMETIDO A CHOQUES DE CARGA DE BTEX**

**Paulo Igor Milen Firmino<sup>(1)</sup>**

Doutor em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da UFC.

**Amanda Nascimento de Barros**

Graduanda em Engenharia Ambiental pela UFC.

**Patrícia Marques Carneiro Buarque<sup>(1)</sup>**

Mestre em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental pela UFC. Doutoranda em Engenharia Civil – Saneamento Ambiental pela UFC.

**Alexandre Colzi Lopes**

Doutor em Engenharia Química e Tecnologia do Meio ambiente pela Universidad de Valladolid - Espanha.

**André Bezerra dos Santos**

Doutor em Saneamento Ambiental pela Wageningen University - Holanda. Professor Associado do DEHA da UFC.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Campus do Pici, Bloco 713, Pici – Fortaleza – CE - CEP: 60455-900 - Brasil - Tel: (85) 3366-9490 - e-mail: [igor@deha.ufc.br](mailto:igor@deha.ufc.br)

### **RESUMO**

Entre as várias tecnologias de remediação, *in situ* ou *ex situ*, disponíveis para o tratamento de águas contaminadas com BTEX, os processos biológicos têm se destacado por serem econômicos, eficientes e ambientalmente corretos. Porém, um sistema biológico só pode ser implementado com sucesso se for considerado robusto para o seu propósito, ou seja, ser capaz de lidar com flutuações e de recuperar-se após falhas operacionais. Assim, o presente trabalho avaliou o desempenho de remoção de BTEX de um reator microaeróbio (TDH = 48 h) quando submetido a choques de carga desses hidrocarbonetos aromáticos de 2 a 3,5 vezes a sua concentração usual no período estacionário (3-5 mg·L<sup>-1</sup> para cada composto). Primeiramente, o reator foi submetido a um período de choque (C1) de 4 dias (2 TDH). Após a obtenção de concentrações efluentes similares ou inferiores às alcançadas no período anterior a C1, o reator foi submetido a um segundo choque (C2) com duração de 7 dias (3,5 TDH). Finalmente, para verificar a reprodutibilidade da resposta do sistema, após a obtenção de concentrações efluentes similares ou inferiores às alcançadas no período anterior a C2, o reator foi submetido a um terceiro choque (C3) com a mesma intensidade e duração de C2. O sistema conseguiu lidar com os choques de carga de BTEX com intensidade de 2 a 3 vezes a carga usualmente aplicada. Entretanto, choques consecutivos aumentaram o tempo de recuperação de 2 para 6 dias.

**PALAVRAS-CHAVE:** BTEX, Tratamento microaeróbio, Choque de carga.

### **INTRODUÇÃO**

Hidrocarbonetos monoaromáticos, tais como benzeno, tolueno, etilbenzeno e os isômeros do xileno (BTEX), são importantes constituintes do petróleo bruto e de seus derivados (WEELINK; VAN EEKERT; STAMS, 2010). De fato, esses compostos podem corresponder a até aproximadamente 18%, em massa, de uma mistura padrão de gasolina (JO et al., 2008). Portanto, a partir do vazamento acidental de tubulações e tanques de armazenamento subterrâneos de combustíveis fósseis, os BTEX – os quais possuem solubilidade e mobilidade em água relativamente alta – podem contaminar extensivamente solos e aquíferos subterrâneos, comprometendo fontes de água potável (DOU et al., 2008) e representando, assim, um sério problema ambiental e de saúde pública devido à elevada toxicidade e ao potencial carcinogênico desses compostos (FOGHT, 2008).

Além disso, no Brasil, etanol é adicionado à gasolina (20-25%, em volume) de forma a atenuar as emissões atmosféricas automotivas prejudiciais. Entretanto, isso pode agravar o problema de contaminação de aquíferos subterrâneos, já que o etanol pode exercer um efeito de co-solubilidade, aumentando a solubilidade em água dos BTEX e, conseqüentemente, resultando em concentrações mais elevadas (CORSEUIL et al., 2011).

Entre as várias tecnologias de remediação, *in situ* ou *ex situ*, disponíveis para o tratamento de águas contaminadas com BTEX, os processos biológicos (ou biorremediação) têm se destacado por serem econômicos, eficientes e ambientalmente corretos (FARHADIAN et al., 2008). De fato, microrganismos são capazes de degradar BTEX sob condições aeróbias, microaeróbias (ou hipóxicas) e anaeróbias (FUCHS, 2008; WEELINK; VAN EEKERT; STAMS, 2010; YERUSHALMI et al., 2001).

A biorremediação *ex situ* por meio de reatores anaeróbios tem sido utilizada com sucesso no tratamento de águas contaminadas com poluentes químicos ou orgânicos, incluindo os BTEX. Entretanto, alguns parâmetros operacionais, tais como concentração afluente de poluentes, carga orgânica volumétrica, presença de aceptores alternativos de elétrons e outros, podem influenciar no desempenho de degradação desses compostos (FARHADIAN et al., 2008).

Por exemplo, a adição de baixas concentrações de oxigênio pode favorecer a degradação inicial dos compostos BTEX, pois, sob condições microaeróbias, alguns microrganismos podem utilizar oxigênio para introduzir grupos hidroxila no anel aromático como nas rotas aeróbias clássicas, facilitando posteriormente sua clivagem por meio de rotas metabólicas anaeróbias (FUCHS, 2008). Entretanto, os experimentos, em batelada ou em fluxo contínuo, de degradação microaeróbia de BTEX encontrados na literatura tem utilizado apenas culturas aeróbias adaptadas a baixas concentrações de oxigênio (SHIM; YANG, 2002; YERUSHALMI et al., 2001). Assim, faz-se necessária a avaliação de processos microaeróbios na degradação de BTEX, principalmente com inóculos anaeróbios operados em condições microaeróbias.

Adicionalmente, variações de carga afluente, pH, temperatura e compostos tóxicos e inibitórios podem afetar negativamente o desempenho de reatores (LEITÃO et al., 2006). Segundo Kraakman (2003), um sistema biológico só pode ser implementado com sucesso se for considerado robusto para o seu propósito, ou seja, ser capaz de lidar com flutuações e de recuperar-se após falhas operacionais. Entretanto, Leitão et al. (2006) afirmam que a noção de estabilidade ou robustez de reatores anaeróbios ainda não é muito clara. Segundo esses autores, robustez pode ser definida como a capacidade dos sistemas de tratamento de alcançar um desempenho estável sob determinadas condições ambientais e operacionais. Sob essa perspectiva, os sistemas anaeróbios são tão estáveis quanto qualquer outro sistema biológico. Porém, estabilidade também pode ser definida em termos de variabilidade do efluente do processo, ou seja, a capacidade de um sistema de lidar com variações ambientais e operacionais mais severas (LEITÃO et al., 2006). Assim, a verificação da robustez de um sistema de tratamento é um procedimento essencial, de grande importância para biorremediação *ex situ* de águas contaminadas com BTEX.

Face ao exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho de remoção de BTEX de um reator microaeróbio quando submetido a simulações de choques de carga.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Reator

O experimento em fluxo contínuo foi realizado, sob condições microaeróbias, em reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB, *up-flow anaerobic sludge blanket*), em escala laboratorial (volume útil de 3,3 L), feito a partir de tubos e conexões de PVC para esgoto, previamente adaptado aos compostos BTEX. Utilizou-se como inóculo lodo anaeróbio (~50 g SSV·L<sup>-1</sup>) de um reator de circulação interna (IC, *internal circulation*) mesofílico de uma cervejaria (Horizonte, Ceará, Brasil), cuja atividade metanogênica específica (AME) foi 0,63 g DQO (glicose)·g SSV<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>.

O afluente era armazenado a aproximadamente 5 °C em um recipiente de PVC (volume total de 7 L) provido de uma atmosfera de N<sub>2</sub> (100%, White Martins, Brasil), a partir de uma bolsa de Tedlar® para amostragem de gás (Supelco, EUA), a fim de evitar a volatilização de BTEX dentro do recipiente e minimizar o contato do afluente com o O<sub>2</sub> do ar.

O reator era alimentado por meio de bomba peristáltica (Minipuls 3, Gilson, EUA) através de tubos flexíveis de Tygon® *Fuel and Lubricant* (Cole-Parmer, EUA) – material inerte aos compostos aromáticos testados – e operado à temperatura ambiente de aproximadamente 27 °C.

O efluente era recirculado por meio de bomba dosadora (Concept Plus, ProMinent Dosiertechnik GmbH, Alemanha), e, em algumas etapas experimentais, um sistema de microaeração era aplicado ao reator por meio de bomba peristáltica (Minipuls 3, Gilson, EUA). O biogás produzido era coletado e medido por um medidor de gás previamente calibrado (método de deslocamento de líquido).

### Água contaminada sintética

A água contaminada sintética consistia de uma solução aquosa contendo BTEX, ou seja, benzeno (99,5%, Dinâmica Química, Brasil), tolueno (99,5%, Vetec, Brasil), etilbenzeno (99,0%, Sigma-Aldrich, EUA), o-xileno (98,0%, Fluka, EUA), m-xileno (99,0%, Sigma-Aldrich, EUA) e p-xileno (99,0%, Sigma-Aldrich, EUA), um co-substrato, meio basal (macro e micronutrientes) e um tampão. O co-substrato era o etanol (99,8%, Dinâmica, Brasil), e o meio basal era preparado de acordo com Firmino et al. (2010). Para manter o pH próximo a 7,0, a solução era tamponada com bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ) na proporção de 1 g de  $\text{NaHCO}_3$  para cada 1 g DQO. Todos os reagentes foram utilizados como adquiridos, sem purificação adicional.

### Procedimento experimental

Avaliou-se o desempenho de remoção de BTEX do reator microaeróbio (TDH = 48 h) quando submetido a choques de carga desses hidrocarbonetos aromáticos de 2 a 3,5 vezes a sua concentração usual no período estacionário (dependendo do composto) (Tabela 1). Primeiramente, o reator foi submetido a um período de choque (C1) de 4 dias (2 TDH). Após a obtenção de concentrações efluentes similares ou inferiores às alcançadas no período anterior a C1, o reator foi submetido a um segundo choque (C2) com duração de 7 dias (3,5 TDH), já que o impacto do aumento da concentração de BTEX no desempenho de remoção de alguns compostos não foi muito evidente. Finalmente, para verificar a reprodutibilidade da resposta do sistema, após a obtenção de concentrações efluentes similares ou inferiores às alcançadas no período anterior a C2, o reator foi submetido a um terceiro choque (C3) com a mesma intensidade e duração de C2.

**Tabela 1: Concentrações médias afluentes de BTEX durante período estacionário (PE) e períodos de choque (C1, C2 e C3), e intensidade de choque (I).**

Composto	PE	C1	C2		C3		
	Conc.	Conc.	I	Conc.	I	Conc.	I
Benzeno	$3,3 \pm 0,3$	$10,1 \pm 0,6$	3,0	$11,2 \pm 0,7$	3,4	$11,3 \pm 0,3$	3,4
Tolueno	$5,0 \pm 1,0$	$13,4 \pm 0,4$	2,7	$13,0 \pm 0,7$	2,6	$13,1 \pm 0,4$	2,6
Etilbenzeno	$4,9 \pm 0,8$	$9,9 \pm 1,3$	2,0	$11,5 \pm 1,5$	2,4	$12,8 \pm 0,7$	2,6
o-Xileno	$4,2 \pm 0,8$	$8,7 \pm 1,2$	2,1	$9,2 \pm 1,3$	2,2	$10,1 \pm 0,5$	2,4
m,p-Xilenos	$8,3 \pm 1,5$	$17,2 \pm 2,3$	2,1	$19,4 \pm 2,9$	2,3	$21,7 \pm 1,3$	2,6
BTEX	$25,7 \pm 4,1$	$59,3 \pm 4,6$	2,3	$64,4 \pm 5,9$	2,5	$68,8 \pm 2,9$	2,7

PE, período estacionário; C1, choque 1 (2 TDH); C2, choque 2 (3,5 TDH); C3, choque 3 (3,5 TDH); conc., concentração em  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; I, intensidade do choque (conc. choque/conc. PE).

### Análises químicas e cromatográficas

DQO e pH eram determinados de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

Os compostos BTEX eram determinados por extração por *headspace* estático (Triplus HS, Thermo Scientific, USA) seguido de cromatografia gasosa com detecção por fotoionização (HS-GC-PID, *headspace-gas chromatography-photoionization detection*) (Trace GC Ultra, Thermo Scientific, USA) conforme Carneiro et al. (2014).

A caracterização de biogás foi realizada, em termos de ar ( $\text{O}_2 + \text{N}_2$ ),  $\text{CO}_2$ , e  $\text{CH}_4$ , por cromatografia gasosa com detecção por condutividade térmica (GC-TCD, *gas chromatography-thermal conductivity detection*) (GC-17A, Shimadzu Corporation, Japão) conforme Firmino et al. (2015).

## RESULTADOS

Antes do primeiro choque de carga de BTEX (C1), as concentrações médias efluentes dos compostos benzeno, tolueno, etilbenzeno, o-xileno e m,p-xilenos eram aproximadamente 810, 235, 380, 565 e 870  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectivamente. Durante C1 (duração de 4 dias), com exceção do benzeno, a resposta do sistema não foi muito evidente. Para esse composto, observou-se um aumento da concentração efluente para quase 1400  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , e o reator levou 3 dias para alcançar valores similares aos obtidos no período pré-choque. Por outro lado, para os demais compostos, as concentrações efluentes praticamente permaneceram inalteradas durante C1. Entretanto, a partir do dia 15 de operação (6 dias após o término de C1), menores concentrações efluentes foram obtidas, especialmente para o etilbenzeno.

Segundo Cai et al. (2010), a estabilidade de um biorreator pode ser caracterizada em dois aspectos: resistibilidade, definida como a capacidade de resistir a qualquer perturbação no sistema, e resiliência, definida como a capacidade de recuperar-se da perturbação. Por serem conceitos abstratos, os autores supracitados afirmam que não podem ser considerados como índices de julgamento. Logo, para avaliar de forma concreta a robustez do sistema durante choques de carga, recomendam o uso de parâmetros específicos apresentados por Cai et al. (2009): índice de sensibilidade (IS), resposta causada por unidade de intensidade de choque (R) e tempo de recuperação (TR). Os parâmetros IS e R são calculados de acordo com as Equações 1 e 2, em que  $O_{\text{máx}}$  é a concentração máxima de substrato observada no efluente,  $O_n$  é a concentração normalmente observada no efluente antes do choque, e I é a intensidade do choque. TR é definido como tempo necessário para que o sistema alcance valores similares aos obtidos no período pré-choque após término do choque de carga.

$$\text{IS} = \frac{O_{\text{máx}} - O_n}{O_n} \quad (1)$$

$$R = \frac{O_{\text{máx}} - O_n}{I} \quad (2)$$

Na Tabela 2, são apresentados, então, os parâmetros IS, R e TR calculados para C1, a partir dos quais se pode confirmar o que foi mencionado para o primeiro choque de carga. Enquanto o IS do benzeno foi 0,75 – o que representa um aumento máximo de 75% no valor da concentração efluente em relação à obtida no período anterior a C1 –, os IS dos demais compostos foram menores do que 0,30. Os tempos de recuperação variaram de 3 a 6 dias.

Como o impacto do aumento da concentração afluente de BTEX no desempenho de remoção de alguns compostos não foi muito evidente para um período de 4 dias (C1), o reator foi submetido a um segundo choque (C2) com duração de 7 dias (3,5 TDH). Com exceção do etilbenzeno, o aumento do tempo de exposição parece ter tornado o impacto do aumento da carga de BTEX mais evidente para todos os compostos, notadamente para benzeno e tolueno. Embora as concentrações efluentes máximas alcançadas para todos os hidrocarbonetos não tenham superado as do primeiro choque (C1), os IS calculados para C2 foram maiores (~2 vezes) do que os obtidos para C1 (Tabela 2), já que as concentrações registradas antes de C2 eram inferiores às anteriores a C1. Contudo, o sistema apresentou uma recuperação bem mais rápida do que observado no primeiro choque ( $\text{TR} \leq 2$  dias) (Tabela 2).

Para verificar a reprodutibilidade da resposta do sistema, o reator foi submetido a um terceiro choque (C3) com a mesma intensidade e duração de C2. As concentrações efluentes máximas foram superiores às obtidas em C2. Consequentemente, os parâmetros IS e R calculados para C3 foram maiores dos que os registrados para o choque anterior (Tabela 2), especialmente para o tolueno, cujo valor dos parâmetros foi praticamente o dobro, e para o etilbenzeno, que apesar de ter mostrado um comportamento completamente diferente dos demais compostos nos dois primeiros choques, apresentou o segundo maior IS em C3 (Tabela 2). Contudo, diferentemente do observado em C2, foram necessários 6 dias (TR) para que o reator obtivesse um efluente com qualidade similar à do período anterior ao início de C3 (Tabela 2).

Tabela 7.2 – Efeito dos períodos de choque de carga de BTEX (C1, C2 e C3) e tempo de recuperação (TR).

Choque	Composto	I	IS	R ( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	TR (dias)
C1	Benzeno	3,0	0,75	200	3
	Tolueno	2,7	0,27	23	3
	Etilbenzeno	2,0	-	-	-
	o-Xileno	2,1	0,19	51	6
	m,p-Xilenos	2,1	0,14	58	6
	BTEX	2,3	0,20	250	3
C2	Benzeno	3,4	1,75	260	2
	Tolueno	2,6	0,60	28	1
	Etilbenzeno	2,4	-	-	-
	o-Xileno	2,2	0,36	76	2
	m,p-Xilenos	2,3	0,37	110	2
	BTEX	2,5	0,58	449	2
C3	Benzeno	3,4	1,80	285	6
	Tolueno	2,6	1,13	51	6
	Etilbenzeno	2,6	1,50	58	6
	o-Xileno	2,4	0,47	99	6
	m,p-Xilenos	2,6	0,43	133	6
	BTEX	2,7	0,88	678	6

C1, choque 1 (2 TDH); C2, choque 2 (3,5 TDH); C3, choque 3 (3,5 TDH); I, intensidade do choque (conc. choque/conc. período estacionário); IS, índice de sensibilidade; R, resposta causada por unidade de intensidade de choque; TR, tempo de recuperação após fim do período de choque.

Um aspecto importante a ser considerado no desempenho de remoção de sistemas de tratamento submetidos a choques de carga de substrato é verificar se o aumento da concentração efluente corresponde à quantidade adicional de substrato aplicada durante o período de choque, ou seja, se a capacidade do reator já está em seu limite, e o excesso de substrato não é removido. No presente estudo, o aumento da quantidade de BTEX no efluente foi bem menor do que a quantidade adicional aplicada durante todos os períodos de choque. Além disso, de modo geral, as concentrações efluentes começavam a diminuir no próprio período de choque, normalmente após a metade desse período. Portanto, supõe-se que o reator estava subcarregado e mostrou potencial para remover uma carga de BTEX maior do que a usualmente aplicada.

Dentre os diferentes compostos testados, o benzeno foi o que apresentou a maior variação das concentrações efluentes durante os choques, apresentando os maiores índices de sensibilidade (IS) (Tabela 2). Entretanto, sua intensidade de choque era quase sempre 1 unidade maior do que a dos outros compostos. Logo, isso pode influenciar no julgamento de qual desses hidrocarbonetos é o mais recalcitrante em situações de carga transiente. Porém, pelo parâmetro R, é possível verificar qual o aumento da concentração efluente por unidade de choque. Assim, confirma-se que o benzeno foi o composto mais recalcitrante, apresentando R superior a  $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  em todos os períodos de choque testados, enquanto o tolueno foi considerado menos problemático ( $R \leq 51$ ) (Tabela 2).

Por fim, não foram verificadas mudanças no desempenho de remoção de DQO (~93%) do reator durante todo este experimento, já que as maiores concentrações de BTEX correspondiam no máximo 10% da DQO afluente total. Portanto, de modo geral, o reator sob condições microaeróbicas conseguiu lidar com os choques de carga de BTEX embora choques consecutivos tenham aumentado seu tempo de recuperação.

## CONCLUSÕES

O sistema conseguiu lidar com os choques de carga de BTEX com intensidade de 2 a 3 vezes a carga usualmente aplicada. Entretanto, choques consecutivos aumentaram o tempo de recuperação de 2 para 6 dias.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21st ed. Washington: American Public Health Association, 2005.
2. CAI, J.; ZHENG, P.; MAHMOOD, Q. Simultaneous sulfide and nitrate removal in anaerobic reactor under shock loading. *Bioresource Technology*, v. 100, n. 12, p. 3010-3014, 2009.
3. CAI, J.; ZHENG, P.; MAHMOOD, Q. Influence of transient pH and substrate shocks on simultaneous anaerobic sulfide and nitrate removal. *Journal of Hazardous Materials*, v. 174, n. 1-3, p. 162-166, 2010.
4. CARNEIRO, P.M.; FIRMINO, P.I.M.; COSTA, M.C.; LOPES, A.C.; DOS SANTOS, A.B. Multivariate optimization of headspace-gas chromatography for the determination of monoaromatic compounds (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes) in waters and wastewaters. *J. Sep. Sci.*, v. 37, p. 265-271, 2014.
5. CORSEUIL, H. X.; MONIER, A. L.; FERNANDES, M.; SCHNEIDER, M. R.; NUNES, C. C.; DO ROSARIO, M.; ALVAREZ, P. J. J. BTEX plume dynamics following an ethanol blend release: geochemical footprint and thermodynamic constraints on natural attenuation. *Environmental Science and Technology*, v. 45, n. 8, p. 3422-3429, 2011.
6. DOU, J.; LIU, X.; HU, Z.; DENG, D. Anaerobic BTEX biodegradation linked to nitrate and sulfate reduction. *Journal of Hazardous Materials*, v. 151, n. 2-3, p. 720-729, 2008.
7. FARHADIAN, M.; DUCHEZ, D.; VACHELARD, C.; LARROCHE, C. Monoaromatics removal from polluted water through bioreactors—A review. *Water Research*, v. 42, p. 1325-1341, 2008.
8. FIRMINO, P. I. M.; SILVA, M. E. R.; CERVANTES, F. J.; DOS SANTOS, A. B. Colour removal of dyes from synthetic and real textile wastewaters in one- and two-stage anaerobic systems. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 7773-7779, 2010.
9. FIRMINO, P.I.M.; FARIAS, R.S.; BUARQUE, P.M.C.; COSTA, M.C.; RODRÍGUEZ, E.; LOPES, A.C.; DOS SANTOS, A.B. Engineering and microbiological aspects of BTEX removal in bioreactors under sulfate-reducing conditions. *Chemical Engineering Journal*, v. 260, p. 503-512, 2015.
10. FOGHT, J. Anaerobic biodegradation of aromatic hydrocarbons: pathways and prospects. *Journal of Molecular Microbiology and Biotechnology*, v. 15, n. 2-3, p. 93-120, 2008.
11. FUCHS, G. Anaerobic metabolism of aromatic compounds. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1125, n. 1, p. 82-99, 2008.
12. JO, M.-S.; RENE, E. R.; KIM, S.-H.; PARK, H.-S. An analysis of synergistic and antagonistic behavior during BTEX removal in batch system using response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*, v. 152, n. 3, p. 1276-1284, 2008.
13. KRAAKMAN, N. J. R. Robustness of a full-scale biological system treating industrial CS<sub>2</sub> emissions. *Environmental Progress*, v. 22, n. 2, p. 79-85, 2003.
14. LEITÃO, R. C.; VAN HAANDEL, A. C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: A review. *Bioresource Technology*, v. 97, n. 9, p. 1105-1118, 2006.
15. SHIM, H.; YANG, S.-T. BTEX removal from contaminated groundwater by a co-culture of *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas fluorescens* immobilized in a continuous fibrous-bed bioreactor. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 77, n. 12, p. 1308-1315, 2002.
16. WEELINK, S. A. B.; VAN EEKERT, M. H. A.; STAMS, A. J. M. Degradation of BTEX by anaerobic bacteria: physiology and application. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 9, n. 4, p. 359-385, 2010.
17. YERUSHALMI, L.; LASCOURREGES, J.-F.; RHOFIR, C.; GUIOT, S. R. Detection of intermediate metabolites of benzene biodegradation under microaerophilic conditions. *Biodegradation*, v. 12, n. 6, p. 379-391, 2001.