

## APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE *WETLANDS* CONTRUÍDOS OPERANDO COMO UNIDADES DE POLIMENTO DE EFLUENTES DE REATORES UASB

### Luciano Matos Queiroz

Doutor em Engenharia Civil - Hidráulica – Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal da Bahia. ([lmqueiroz@ufba.br](mailto:lmqueiroz@ufba.br))

### Lara Lessa Feijó

Engenheira Civil pela Universidade Federal da Bahia. ([lara.lessa@hotmail.com](mailto:lara.lessa@hotmail.com))

### Paula Góis de Lima

Engenheira de Alimentos – Doutoranda no curso de Engenharia Industrial da UFBA. ([pgl.gois@gmail.com](mailto:pgl.gois@gmail.com))

### Luciano de Souza Ferreira

Engenheiro Sanitarista e Ambiental – Mestre em Meio Ambiente Águas e Saneamento - Empresa Baiana de Águas e Saneamento, Empresa Baiana de Águas e Saneamento. ([luciano\\_doug@hotmail.com](mailto:luciano_doug@hotmail.com))

### Thaís Andrade de Sampaio Lopes

Bióloga, Mestranda curso de Meio Ambiente, Águas e Saneamento da UFBA. ([thaislopes84@yahoo.com.br](mailto:thaislopes84@yahoo.com.br))

### Resumo

O presente trabalho objetivou a realização de uma análise crítica sobre a aplicação de *wetlands* construídos como unidades de polimento de efluentes de reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors*). O estudo foi realizado a partir de informações e dados obtidos por meio de trabalhos técnicos e científicos publicados entre os anos de 2000 e 2009, os quais estudaram a capacidade de degradação da matéria orgânica e o grau de remoção de nutrientes em sistemas de *wetlands* construídos exclusivamente para essa finalidade. Foi realizada uma análise estatística relacionando cada um dos parâmetros chave adotados nos projetos dos sistemas (taxas de aplicação superficial, tipos de substrato e macrófitas) com a eficiência de remoção de poluentes. As técnicas utilizadas para verificação da correlação entre as variáveis estudadas foram a estatística descritiva e análise de regressão linear multivariada. Todos os dados foram tratados em nível de significância de 95%. Os resultados permitiram concluir que, de maneira geral, os sistemas de *wetlands* construídos estudados apresentaram valores médios de eficiência de remoção de 78,3%, 54,4% e 66,9% para matéria orgânica, medida como DQO, Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK) e fósforo (P), respectivamente. O excelente desempenho da tecnologia para remoção de DQO foi ratificado pelo teste de hipótese. Os resultados mostram que o tipo de substrato utilizado (areia e brita) não é significativo para a obtenção de elevadas eficiências e remoção de poluentes nos sistemas; por outro lado, o tipo de macrófita utilizado mostrou-se relevante para a remoção de NTK e P.

**Palavras-chave:** efluentes, polimento, reatores UASB, *wetlands* construídos.

### Abstract

This paper shows a critical review of the literature based on information and data obtained through technical and scientific papers published between 2000 and 2009, which studied the ability of degradation of organic matter and the degree of nutrient removal of the application of constructed wetlands as post-treatment units of Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors effluent. A statistical analysis relating each of the key parameters adopted in the design (surface application rates, types of substrate and macrophytes) with the efficiency of pollutant removal was performed. The techniques used to investigate the correlation between variables described were statistics and multivariate linear regression. All data were treated at a significance level of 95%. The wetlands reached average values of removal of 78.3%, 54.4% and 66.9% for COD, Total Kjeldhal Nitrogen (TKN) and phosphorus (P), respectively. The excellent performance of the technology for COD removal was ratified by hypothesis testing. The results show that the type of substrate (sand or gravel) is not significant for obtaining high efficiencies in removing pollutants. However, the type of macrophyte used proved important for the removal of TKN and phosphorus.

**Key words:** Constructed wetlands, effluent, post-treatment, UASB Reactors.

## INTRODUÇÃO

A aplicação de sistemas anaeróbios para o tratamento de esgoto predominantemente doméstico, a exemplo do *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor* – UASB, apresenta muitas vantagens, a saber: é um sistema compacto, não requer praticamente nenhum equipamento inserido no reator, o consumo energético é reduzido e ocorre baixa produção de lodo de excesso. Contudo, considerando a qualidade do efluente final e os restritivos padrões de lançamento de efluentes líquidos no ambiente preconizados pela legislação vigente, uma etapa de polimento do efluente é quase sempre necessária. As principais metas dessa etapa de polimento ou pós-tratamento é o de completar a remoção de matéria orgânica, bem como a de proporcionar a remoção de constituintes pouco afetados pelo tratamento anaeróbio, como os macronutrientes e os organismos patogênicos (vírus, protozoários e helmintos) (JORDÃO *et al.*, 2007).

*Wetlands* construídos são sistemas artificialmente projetados para utilizar macrófitas plantadas sobre substratos específicos, como areia, cascalhos ou outro material inerte, nos quais ocorre a formação de biofilmes que agregam populações variadas de microrganismos. Estes, por meio de processos físicos, químicos e biológicos, removem os poluentes presentes nas águas residuárias. Especificamente na região nordeste do Brasil, excluindo-se a faixa litorânea, a irradiação solar é constante durante quase todo o ano, favorecendo o processo fotossintético das macrófitas. Nesse cenário, a utilização de sistemas de *wetlands* construídos pode ser uma tecnologia viável (SOUSA *et al.*, 2004).

A limitação na eficiência de remoção de material orgânico no tratamento anaeróbio é compensada pela elevada eficiência alcançada pelos *wetlands* construídos, enquanto que os reatores anaeróbios apresentam vantagens quanto à diminuição dos requisitos de área, o que leva à conclusão que ambos os sistemas são complementares e sustentáveis (KIVAISI, 2001).

Além desses fatores, estudos apontam que a colmatação do meio filtrante, que também serve de material suporte para as macrófitas, é uma das desvantagens operacionais mais importantes de *wetlands* construídos aplicados no tratamento de esgoto doméstico, podendo ocorrer,

em curto ou longo prazo, dependendo da concentração de sólidos em suspensão afluente. Assim, os sistemas precedidos do tratamento anaeróbio, sobretudo reatores UASB, proporcionam um alto índice de remoção da matéria orgânica e de sólidos em suspensão totais, contribuindo para evitar ou reduzir problemas de colmatação, fato que reforça a sustentabilidade dessa configuração (VYMAZAL, 2002; RUÍZ *et al.*, 2010).

Vymazal (2002) apresentou resultados médios globais de 88%, 75% e 84% para os parâmetros DBO, DQO e SST, respectivamente, para um conjunto de experiências com *wetlands* construídos que tratam o efluente de tanques sépticos e de decantação. Já Ruíz *et al.* (2010) encontraram percentuais de eficiência de remoção para DBO, DQO e SST, respectivamente de 77%, 71% e 83%, em um sistema composto de reator UASB seguido de sistemas de *wetlands* construídos.

Portanto, a combinação de reatores UASB e *wetlands* construídos proporciona um fluxograma simplificado de tratamento e possibilita uma redução significativa do consumo de energia e dos custos operacionais da estação. Essas características, aliadas à baixa produção de lodo e aos baixos requisitos tecnológicos, tornam esses sistemas atrativos para o tratamento de esgotos domésticos em áreas urbanas e rurais.

O presente trabalho objetivou avaliar as relações entre os principais aspectos de projeto e construção e as eficiências de remoção de matéria orgânica e nutrientes, medidas como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK) e fósforo solúvel (P) de *wetlands* construídos aplicados como alternativa de polimento de efluentes de reatores UASB. Foram adequadas as técnicas de estatística descritiva e análise de regressão linear multivariada aos dados disponíveis na literatura técnica e científica, divulgados em trabalhos publicados entre os anos de 2000 e 2009.

## MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, realizou-se uma revisão da literatura para conhecer, estudar e comparar a eficiência de remoção de DQO, NTK e P de sistemas de *wetlands* construídos operados à jusante de reatores UASB. A partir dessa revisão, levantaram-se as principais condições de

operação e os dados experimentais descritos em artigos científicos publicados entre os anos de 2000 e 2009 nas seguintes bases de dados: *engineering research database*; *web of science* e *sciELO.org*. Utilizaram-se as palavras chave: *wetlands*, *wetlands* construídos, reatores UASB, UASB, UASB *reactors*, *post-treatment*, pós-tratamento. Foram identificados mais de 1.600 artigos científicos. Considerando as palavras: *wetlands*, pós-tratamento e UASB ou *wetlands*, *post-treatment* e UASB, simultaneamente, no título, foram localizados, apenas, nove artigos que descreviam 28 (vinte e oito) sistemas diferentes concebidos e operados sob condições distintas, os quais decorriam de uma grande variedade de resultados de eficiências de remoção dos parâmetros de interesse.

A partir das informações coletadas e características do afluente e efluente dos sistemas, realizou-se uma análise estatística dos dados, aplicando técnicas de estatística descritiva para obtenção dos valores médios das eficiências de remoção dos parâmetros DQO, NTK e P e uma análise de regressão linear multivariada, com o objetivo de avaliar a relação entre variável dependente (variável de saída: DQO efluente e NTK efluente) e as variáveis independentes: área, taxa de aplicação superficial, tempo de detenção hidráulica (TDH), cargas de DQO, NTK e P, concentração de DQO afluente, concentração de NTK afluente e concentração de P afluente. Os dados foram tratados no nível de significância de 5%, utilizando o *software* Minitab 14<sup>®</sup>.

Os cálculos de estatística descritiva foram aplicados para organizar e resumir o tratamento de dados de modo que a relação entre as variáveis se tornasse mais clara. Todos os valores de eficiências de remoção de nitrogênio total e fósforo solúvel expressos como porcentagem de remoção foram agregados e apresentados como valores médios, máximos e mínimos.

A inferência estatística foi aplicada para a obtenção do intervalo de valores de remoção média de DQO, NTK e P, utilizando a distribuição de *t-student* para intervalo de confiança de população com variância desconhecida. O teste de hipótese permite validar ou não uma hipótese elaborada com base em informações contidas na amostra. No presente estudo, esse teste englobou apenas a eficiência de remoção de matéria orgânica, considerando as seguintes hipóteses:

$H_0$  (hipótese nula):  $\mu = 60\%$

$H_a$  (hipótese alternativa):  $\mu > 60\%$  (hipótese unilateral à direita)

Ressalta-se que a variável ( $\mu$ ) representa o valor médio de eficiência de remoção de matéria orgânica em *wetlands* construídos instalados à jusante dos reatores UASB. A técnica estatística aplicada no teste de hipóteses foi a distribuição de *t-student*.

A análise de regressão linear multivariada foi realizada por meio da obtenção de coeficientes múltiplos de correlação utilizando o programa computacional Minitab 14<sup>®</sup>. O coeficiente de correlação múltiplo mede a “força” ou “grau” de relacionamento linear entre a variável dependente e um conjunto de variáveis independentes. Inicialmente, foi considerada como variável dependente a concentração de DQO efluente; posteriormente, o mesmo procedimento foi realizado considerando como variável dependente a concentração de NTK efluente. Neste estudo, foi considerado um nível de confiança de 95%. Dentre os 28 sistemas estudados, apenas 16 reportavam resultados de eficiência de remoção de fósforo solúvel, o que levou os autores a optarem pela não aplicação da técnica de análise de regressão para essa variável.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os resultados, constata-se que os dados são oriundos de trabalhos em escala piloto ou revisões referentes à literatura específica. O pequeno número de pesquisas e publicações em escala real que avaliam a aplicação de *wetlands* construídos como unidade de polimento de efluentes de reatores UASB dificulta o desenvolvimento e a consolidação dessa tecnologia, restringindo a sua adoção em larga escala. Outro resultado relevante é a identificação da ausência de informações referentes às práticas de operação, custos de implantação e rotinas de manutenção desses sistemas. Tendo em vista que essas informações são tão importantes quanto a capacidade de remoção de carga orgânica e nutrientes, ao se avaliar a viabilidade de adoção de *wetlands* construídos como uma opção de tratamento terciário, elaborou-se o Quadro 1 com a finalidade de sistematizar alguns pontos que necessitam de abordagem específica nos trabalhos futuros.

**Quadro 1 – Aspectos ausentes nos trabalhos publicados entre 2000 e 2009 sobre aplicação de *wetlands* construídos como unidades de polimento de efluentes de UASB**

Custos de implantação, considerando sentido de fluxo de escoamento, tipo de substrato e tipo de macrófita utilizado.
Custos de operação, considerando a necessidade de manejo das macrófitas, eventual substituição do substrato, produção de lodo e recirculação do efluente final.
Informações sobre o manejo das macrófitas (relação entre comprimento de caule e folhas com a disponibilidade de nutrientes no esgoto, tempo de poda, produção de resíduo e atração de insetos).
Padronização dos critérios, parâmetros de projeto e operação, sobretudo, no que concerne à prevenção da colmatação e ocorrência dos fenômenos de “curto-circuitos” hidráulicos e sistemas de distribuição do afluente.

**Fonte:** elaboração própria.

A Tabela 1 mostra os resultados dos parâmetros: taxa de aplicação superficial, tipos de substrato e macrófitas e as eficiências de remoção de matéria orgânica e nutrientes, em *wetlands* construídos e aplicados no pós-tratamento de efluentes de reatores UASB, nos trabalhos consultados.

O valor máximo de eficiência de remoção de matéria orgânica, medida como DQO em *wetlands* construídos operando como pós-tratamento de reatores UASB, foi igual a 87,7%, o mínimo foi 60,7% e o valor médio de remoção foi 78,3%. A partir desses valores, constata-se que, de acordo com os trabalhos publicados, os sistemas de *wetlands* construídos quando aplicados como unidades de pós-tratamento de reatores UASB podem apresentar remoções de cargas orgânicas bastante satisfatórias. Oliveira e Von Sperling (2005) realizaram amplo levantamento sobre desempenho de 166 ETE em escala real, operadas nos estados de São Paulo e Minas Gerais, e reportaram que o valor máximo de remoção de DQO em sistemas de lagoas facultativas foi igual a 72% e, para a configuração lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa, esse valor foi igual a 78%, portanto, inferiores ao valor encontrado na nossa pesquisa.

Para confirmar essa observação, realizou-se um teste de hipótese a fim de ratificar tal observação. A aplicação do teste de hipótese para avaliação da eficiência de remoção média de matéria orgânica (DQO), em *wetlands* construídos, demonstra uma capacidade de remoção maior que 60%. Esse resultado foi obtido considerando hipótese nula ( $H_0$ ) igual a 60% e hipótese alternativa ( $H_a$ ) maior que 60%. A estatística do teste por *t-student*, no nível significância de 5%, resultou na rejeição de  $H_0$  e aceitação de  $H_a$ , demonstrando consonância com os intervalos de eficiência média de DQO obtidos anteriormente.

Portanto, esses resultados demonstram que *wetlands* construídos são uma boa alternativa de pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios no que concerne à remoção de matéria orgânica e atendimento ao preconizado na legislação ambiental vigente. Ademais, destaca-se que, quando comparados aos sistemas de lagoas de estabilização, a configuração UASB seguidos de *wetlands* construídos resulta em uma significativa redução de requisito de área.

A partir dos dados de medida de posição e dispersão, dando relevância ao tipo de substrato empregado – areia ou brita (Tabela 2) –, buscou-se obter uma relação entre a eficiência do processo e o tipo de substrato utilizado na construção das *wetlands*. Ressalta-se que, nos trabalhos consultados que utilizaram brita como substrato, foram sempre utilizadas brita 0 ou brita 1 como meio suporte para crescimento das macrófitas.

Os resultados dos cálculos mostram uma significativa variabilidade dos valores obtidos para eficiência média de remoção dos poluentes, em decorrência do alto valor de desvio padrão. Logo, o valor estimado pode não ser exatamente igual ao valor verdadeiro, tornando-se importante determinar o intervalo que conterá o valor verdadeiro do parâmetro desejado. Esse intervalo permite estimar a margem de erro do processo de estimativa do parâmetro a partir do estabelecimento de limites que, com certa probabilidade, incluam o verdadeiro valor da média de eficiência de remoção dos parâmetros analisados. No nível de significância ( $\alpha$ ) igual a 0,05, em 95% dos possíveis valores, o verdadeiro valor médio da eficiência de remoção de matéria orgânica, medida como DQO, está no intervalo [75,3; 80,4%] para o substrato areia, e no intervalo [70,4; 83,2%] quando o substrato utilizado foi brita 0 ou brita 1. Para o parâmetro NTK, o valor

verdadeiro pertence ao intervalo [51,5; 69,9%] para areia e [33,6; 52,9%] para a brita 0 ou brita 1. Para obtenção do verdadeiro valor médio da eficiência de remoção de P, só foram considerados sistemas cujo substrato utilizado foi areia, pois nenhum dos trabalhos consultados que

utilizaram sistemas cujo substrato foi constituído de brita 0 ou brita 1 reportou resultados de eficiência de remoção de P. Após a realização dos cálculos, o verdadeiro valor médio da eficiência de remoção de P está inserido no intervalo [47,9; 84,0%].

**Tabela 1 – Parâmetros de projeto e operacionais e eficiências de remoção obtidas em sistemas em wetlands construídos**

	MACRÓFITA	SUBSTRATO	TX. DE APLIC SUPERFICIAL (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> .d)	REMOÇÃO DQO (%)	REMOÇÃO NTK (%)	REMOÇÃO FÓSFORO (%)
SISTEMA I <sup>a</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	4,5	80,9	59,1	88,7
SISTEMA II <sup>a</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	3,3	84,0	58,6	88,7
SISTEMA III <sup>a</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	2,3	83,7	76,0	100
SISTEMA IV <sup>a</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	4,5	79,0	64,9	78,5
SISTEMA V <sup>a</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	3,3	81,0	65,4	84,0
SISTEMA VI <sup>a</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	2,3	83,9	87,3	100
SISTEMA VII <sup>b</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	3,3	74,1	39,8	37,7
SISTEMA VIII <sup>b</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	3,3	80,7	66,8	81,0
SISTEMA IX <sup>c</sup>	<i>Typha</i>	Brita	11,6	60,7	23,0	NA
SISTEMA X <sup>d</sup>	<i>Typha</i>	Areia	3,6	69,7	41,8	23,5
SISTEMA XI <sup>d</sup>	<i>Typha</i>	Areia	3,6	78,0	27,3	38,2
SISTEMA XII <sup>e</sup>	<i>Typha</i>	Areia	15,2	80,8	74,7	75,1
SISTEMA XIII <sup>e</sup>	<i>Colocasia</i>	Areia	15,2	76,1	75,7	76,4
SISTEMA XIV <sup>f</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	3,3	79,3	50,0	86,4
SISTEMA XV <sup>f</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	3,3	72,0	48,1	1,8
SISTEMA XVI <sup>f</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	2,3	79,3	76,0	91,5
SISTEMA XVII <sup>f</sup>	<i>Juncus sp.</i>	Areia grossa	2,3	74,3	65,4	18,5
SISTEMA XVIII <sup>g</sup>	<i>Typha</i>	Areia	13,8	69,1	-	NA
SISTEMA XIX <sup>h</sup>	<i>Typha</i>	Brita 0 e 1	4,2	78,5	55,9	NA
SISTEMA XX <sup>h</sup>	<i>Brachiaria sp.</i>	Brita 0 e 1	4,2	87,7	66,1	NA
SISTEMA XXI <sup>h</sup>	<i>Brachiaria sp.</i>	Brita 0 e 1	6,9	72,3	23,7	NA
SISTEMA XXII <sup>h</sup>	<i>Typha</i>	Brita 0 e 1	6,9	83,1	35,6	NA
SISTEMA XXIII <sup>h</sup>	<i>Typha</i>	Brita 0 e 1	10,4	84,3	41,2	NA
SISTEMA XXIV <sup>h</sup>	<i>Brachiaria sp.</i>	Brita 0 e 1	10,4	85,7	60,8	NA
SISTEMA XXV <sup>h</sup>	<i>Brachiaria sp.</i>	Brita 0 e 1	17,1	80,0	41,2	NA
SISTEMA XXVI <sup>h</sup>	<i>Typha</i>	Brita 0 e 1	17,1	77,1	33,3	NA
SISTEMA XXVII <sup>h</sup>	<i>Typha</i>	Brita	6,3	78,6	54,9	NA
SISTEMA XXVIII <sup>h</sup>	<i>Brachiaria sp.</i>	Brita	6,3	77,4	56,9	NA

<sup>a</sup> Sousa et al., 2000; <sup>b</sup> Sousa et al., 2001; <sup>c</sup> Kaseva, 2004; <sup>d</sup> El-Khateeb and El-Gohary, 2003; <sup>e</sup> Mbuligwe, 2004; <sup>f</sup> Sousa et al., 2004; <sup>g</sup> El-Khateeb et al., 2009; <sup>h</sup> Calijuri et al., 2009;

NA = Não analisado.

Fonte: elaboração própria.

**Tabela 2 – Resultados de eficiência de remoção de matéria orgânica, expressos em DQO, e nutrientes, expressos como NTK e P, em sistemas de wetlands construídos em relação ao substrato utilizado**

PARÂMETRO	SUBSTRATO	EFICIÊNCIA MÉDIA (%)	DESVIO PADRÃO (S)	VARIÂNCIA	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
DQO	Areia	77,8	4,8	23,2	6,2	69,1	84,0
	Brita	76,8	9,6	91,8	12,5	56,3	87,7
NTK	Areia	60,7	16,6	275,1	27,3	27,3	87,3
	Brita	43,3	15,2	231,6	35,2	23,0	66,1
P	Areia	65,9	32,5	1059,2	49,3	1,8	100

Fonte: elaboração própria.

Comparando-se os valores dos intervalos calculados estatisticamente quanto a eficiência de remoção de matéria orgânica, na forma de DQO, e nitrogênio (NTK) utilizando como substrato das *wetlands* areia ou brita, constata-se que os mesmos são muito próximos. Portanto, é válido afirmar que o tipo de substrato não foi relevante na avaliação de remoção desses poluentes nos sistemas comparados.

A Tabela 3 mostra as medidas de posição e dispersão dos valores das eficiências médias de remoção de DQO, NTK e P, considerando relevante o tipo de macrófita utilizado: *Juncus* spp., *Brachiaria* sp. e *Thypha* spp. Vale ressaltar que nem todas as macrófitas mostradas na

Tabela 1 foram utilizadas para efeito de comparação, pois o número de trabalhos científicos que reportam a utilização de outras espécies que não as três citadas não foi suficiente para a aplicação dos cálculos estatísticos.

Considerando nível de significância ( $\alpha$ ) igual a 0,05, para 95% dos dados, para sistemas que utilizaram a macrófita *Juncus* spp, o verdadeiro valor da média da eficiência de remoção de DQO está inserido no intervalo [76,3;82,2%]; remoção de NTK está compreendido entre [53,0;72,5%]; e remoção de P, entre [46,3;94,7%]. Quando a macrófita plantada foi *Typha* spp., o verdadeiro valor da média da eficiência de remoção de DQO está inserido no intervalo entre [70,5;81,5%]; remoção de NTK está compreendido entre [29,8;56,3%]; e remoção de P, entre [-6,3;36,7%]. Destaca-se que só foram encontrados três trabalhos que reportavam a

aplicação da macrófita *Brachiaria* sp., fato que reduz a validade estatística dos dados expostos na Tabela 3. Porém, os autores julgaram pertinente a inclusão desses resultados pelo fato de se tratar de uma gramínea, o que, no contexto de aplicação de sistemas de *wetlands* construídos em áreas rurais, se torna interessante, pois a *Brachiaria* sp. pode ser utilizada como alimento para rebanhos. Nos casos dos sistemas plantados com *Brachiaria* sp., o valor verdadeiro da média de eficiência de remoção de DQO está compreendido no intervalo entre [72,0;89,3%] e de remoção de NTK entre [25,8;73,7%].

A análise de regressão permitiu avaliar a influência dos parâmetros de projeto na remoção de DQO e NTK. As seguintes equações foram geradas:

$$DQO_{EF} = - 57,4 + 88,7 C_P + 9,37 \text{ ÁREA} \quad (A)$$

$$NTK_{EF} = 85,8 + 4,33 \text{ ÁREA} - 7,74 \text{ TDH} - 25,0 C_{NTK} - 2,30 P_{AF} + 46,5 C_P \quad (B)$$

onde:

DQO<sub>EF</sub> = concentração de Demanda Química de Oxigênio efluente (mgO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>);

ÁREA = área (m<sup>2</sup>);

C<sub>P</sub> = carga aplicada de fósforo (P) (g.(m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>);

NTK<sub>EF</sub> = concentração de Nitrogênio Total Kjeldhal efluente (mg.L<sup>-1</sup>);

TDH = tempo de detenção hidráulica (dia);

P<sub>AF</sub> = concentração de fósforo afluente (mg.L<sup>-1</sup>).

**Tabela 3 – Resultados das eficiências de remoção de matéria orgânica, expressos em DQO, e nutrientes, expressos como NTK e P, em sistemas *wetlands* construídos relacionados com o tipo de macrófita utilizada**

PARÂMETRO	MACRÓFITA	EFICIÊNCIA MÉDIA (%)	DESVIO PADRÃO (S)	VARIÂNCIA	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
DQO	<i>Brachiaria</i> sp.	80,6	6,2	37,0	7,7	72,3	87,7
	<i>Juncus</i> spp.	79,2	4,2	17,3	5,2	72,0	84,0
	<i>Typha</i> spp.	76,0	7,3	53,5	9,6	60,7	84,3
NTK	<i>Brachiaria</i> sp.	49,7	17,2	297,5	34,7	23,7	66,1
	<i>Juncus</i> spp.	62,8	13,8	190,8	22,0	39,8	87,3
	<i>Typha</i> spp.	43,1	16,3	264,5	37,7	23,0	74,7
P	<i>Juncus</i> spp.	70,5	34,4	1183,6	48,8	1,8	100
	<i>Typha</i> spp.	15,2	8,8	697,1	173,6	0	75,1

Fonte: elaboração própria.

**Quadro 2 – Variáveis selecionadas pela técnica *Stepwise*, as quais devem fazer parte dos modelos**

Variáveis para modelo de DQO efluente			Variáveis para modelo de NTK efluente					
Step	1	2	Step	1	2	3	4	5
Constant	19,34	-57,43	Constant	5,398	4,994	121,972	116,080	85,759
ÁREA	3,40	9,37	ÁREA	1,38	3,21	1,83	2,11	4,33
T-Value	5,16	3,63	T-Value	2,48	4,69	4,29	6,85	5,82
P-Value	0,000	0,005	P-Value	0,033	0,001	0,003	0,000	0,001
C_P		89	TDH	-2,27	-9,27	-8,33	-7,74	
T-Value		2,37	T-Value	-3,28	-6,84	-8,46	-11,30	
P-Value		0,042	P-Value	0,010	0,000	0,000	0,000	
S	7,04	5,82	C_NTK		-27,4	-23,3	-25,0	
R-Sq	72,73	83,21	T-Value		-5,34	-6,17	-9,66	
R-Sq(adj)	70,00	79,47	P-Value		0,001	0,000	0,000	
			P_AF		-1,91	-2,30		
			T-Value		-3,12	-5,36		
			P-Value		0,017	0,002		
			C_P				47	
			T-Value				3,10	
			P-Value				0,021	
			S	5,97	4,25	2,11	1,46	0,976
			R-Sq	38,09	71,80	93,82	97,42	99,01
			R-Sq(adj)	31,90	65,53	91,50	95,94	98,18

Fonte: elaboração própria.

O Quadro 2 mostra o resultado da técnica *Stepwise* aplicada na seleção das variáveis que fazem parte do modelo predito. Constata-se que o modelo (A) explica 79,5% da variabilidade da concentração de DQO efluente, e o modelo (B) explica 98,2% da concentração de NTK efluente na configuração de processo com *wetland* como pós-tratamento de reatores UASB.

### CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho permitem concluir que:

- São necessários mais estudos que avaliem a aplicação de *wetlands* construídos como unidades de polimento de efluentes de reatores UASB em escala real, reportando aspectos como: custos de construção e operação, manejo de macrófitas e produção de lodo.
- *Wetlands* construídos implantados como pós-tratamento de reatores UASB apresentam valores médios de eficiências de remoção de 78,3% para matéria orgânica quantificada como DQO, 54,5% para NTK e 66,9% para fósforo solúvel. Vale ressaltar que esses valores foram obtidos a partir do estudo do conjunto de amostras como um todo, sem considerar a influência do tipo de macrófita ou do tipo de substrato. A capacidade de remoção de DQO acima de 60% foi ratificada pelo teste de hipótese.

- Considerando sistemas que utilizaram como substrato areia ou brita com dimensões entre 5 e 22 mm, a avaliação da influência do tipo de substrato adotado indicou que esse parâmetro não é relevante para a garantia de eficiência dos sistemas.
- A avaliação da influência do tipo de macrófita adotada mostrou que, em relação à remoção de matéria orgânica, expressa em DQO, o tipo de planta adotada não é significativo para análise de eficiência do sistema. Porém, em relação aos nutrientes, expressos em NTK e P, foi verificada relativa relevância, mas não se pôde concluir que essa diferença de eficiência foi causada pelos fatores avaliados.
- O trabalho não analisou a influência dos parâmetros de projeto: taxa de aplicação superficial e tempo de detenção hidráulico sobre o desempenho dos sistemas. Recomenda-se ampliar a análise aqui apresentada, incluindo esses parâmetros.

### REFERÊNCIAS

CALIJURI M. L.; BASTOS R. K. X.; MAGALHÃES T. B.; CAPELETE B. C.; DIAS E. H. O. Tratamento de esgotos sanitários em sistemas reatores UASB/Wetlands construídas de fluxo horizontal: eficiência e estabilidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e

coliformes. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 14, n. 3, p. 421-430, 2009.

EL-KATHEEB M. A.; AL-HERRAWY A. Z.; KAMEL M. M.; EL-GOHARY F. A. Use of wetlands as post-treatment of anaerobically treated effluent. Desalination, v. 245, n. 1-3, p. 50-59, 2009.

\_\_\_\_\_; EL-GOHARY, F. A. Combining UASB technology and constructed wetland for domestic wastewater reclamation and reuse. Water Science and Technology, v. 3, n. 4, p. 201-208, 2003.

JORDÃO, E. P.; VOLSCHAN JÚNIOR, I.; ALEM SOBRINHO, P. Secondary WWTP preceded by UASB reactors – an excellent Brazilian experience. Water Practice and Technology, v. 4, n. 1, p. 1-8, 2007.

KASEVA, M. E. Performance of a sub-surface flow constructed wetland in polishing pre-treated wastewater – a tropical case study. Water Research, v. 38, n. 3, p. 681-687, 2004.

KIVAISI, A. K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. Ecological Engineering, v. 16, p. 545-560, 2001.

MBULIGWE, S. E. Comparative effectiveness of engineered wetland systems in the treatment of anaerobically pre-treated domestic wastewater. Ecological Engineering, v. 23, n. 4-5, p. 269-284, 2004.

OLIVEIRA, S. M. A. C.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 1 – Análise de desempenho. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 10, n. 4, p. 347-357, 2005.

RÚIZ, I.; DÍAZ, M. A.; CRUJEIRAS, B.; GARCÍA, J.; SOTO, M. Solids hydrolysis and accumulation in a hybrid anaerobic digester-constructed wetlands system. Ecological Engineering, v. 36, p. 1007-1016, 2010.

SOUSA, J. T.; VAN HAANDEL A. C.; CONSENTINO P. R. S.; GUIMARÃES A. V. R. Pós-tratamento efluentes de reator UASB utilizando sistemas “wetlands” construídos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4, n. 1, p. 87-91, 2000.

\_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_; GUIMARÃES A. V. A. Comparação entre sistemas wetlands tratando efluente anaeróbio. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2001 (1 CD ROM).

\_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_; LIMA E. P. C.; HENRIQUE I. N. Utilização de wetland construído no pós-tratamento de

esgotos domésticos pré-tratados em reator UASB. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 9, n. 4, p. 285-290, 2004.

VYMAZAL, J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. Ecological Engineering v. 18, p. 633–646, 2002.