

EFEITO DA TAXA DE AERAÇÃO NO DESEMPENHO DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS AERADOS INTERMITENTEMENTE

JOÃO GABRIEL THOMAZ QUELUZ; LAUREN NOZOMI MARQUES YABUKI E MARCELO LOUREIRO GARCIA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Avenida 24 A, 1515, CEP: 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil.

queluz@fca.unesp.br; lauren.yabuki@unesp.br; marcelo.garcia@unesp.br

1 RESUMO

O presente trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar o efeito de diferentes taxas de aeração na remoção de nitrogênio total (NT) e demanda química de oxigênio (DQO) em alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal (ACFH) aerados intermitentemente. Para isso, foram avaliados quatro ACFH em escala piloto utilizando diferentes taxas de aeração (0; 2; 5 e 10 L min⁻¹) com intervalo de aeração intermitente fixo de 3 h d⁻¹ (1h com aeração/7 horas sem aeração). Os sistemas receberam 8,6 L d⁻¹ de efluente sintético, resultando em tempo de detenção hidráulica de 3 dias. Os resultados mostram que os ACFH aerados intermitentemente apresentaram elevada eficiência na remoção de DQO (>97%), NT (>80%) e NH₄⁺ (>97%), enquanto o ACFH sem aeração apresentou menor eficiência na remoção de DQO (93,9%), NT (48,8%) e NH₄⁺ (57,7%). Adicionalmente, os resultados também mostram que os três ACFH aerados intermitentemente obtiveram desempenho similar na remoção de DQO, NT e NH₄⁺. Finalmente, os resultados permitem concluir que a aeração intermitente permite a ocorrência simultânea da nitrificação e da desnitrificação, aprimorando, assim, o desempenho dos ACFH na remoção de NT. Entretanto, o uso de diferentes taxas de aeração não altera a eficiência de remoção de NT e DQO.

Palavras-chave: aeração artificial, remoção de DQO, remoção de nitrogênio.

QUELUZ, J. G. T.; YABUKI, L. N. M.; GARCIA, M. L.

EFFECT OF AERATION RATE ON THE PERFORMANCE OF INTERMITTENTLY AERATED CONSTRUCTED WETLAND

2 ABSTRACT

The aim of the present work was to evaluate the effect of different aeration rates on the removal of total nitrogen (TN) and chemical oxygen demand (COD) in intermittently aerated horizontal subsurface flow constructed wetlands (HFCW). Four pilot-scale HFCWs were evaluated using different aeration rates (0, 2, 5, and 10 L min⁻¹) with a fixed intermittent aeration interval of 3 h d⁻¹ (1 h with aeration / 7 h without aeration). The HFCWs received 8.6 L d⁻¹ of synthetic effluent, resulting in a hydraulic retention time of 3 days. The results show that intermittently aerated HFCWs were highly efficient in removing COD (>97%), TN (>80%) and NH₄⁺ (>97%), while the HFCW without aeration showed lower efficiencies in the removal of COD (93.9%), TN (48.8%), and NH₄⁺ (57.7%). In addition, the results also show that the three intermittently aerated HFCW achieved similar performance in the removal of COD, TN, and NH₄⁺. Finally, the results indicate that intermittent aeration allows the simultaneous occurrence

of nitrification and denitrification, thus improving the performance of HFCW in removing TN. However, the use of different aeration rates does not alter COD and TN removal efficiencies.

Keywords: artificial aeration, COD removal, the nitrogen removal.

1 INTRODUÇÃO

Alagados construídos de fluxo subsuperficial são sistemas de tratamento de efluentes de fácil operação, simples, pouco dispendiosos e têm elevada eficiência de remoção de matéria orgânica, sólidos e patógenos e, portanto, são ideais para comunidades rurais isoladas e de baixa renda. Entretanto, devido ao suprimento limitado de oxigênio dissolvido (OD) a eficiência na remoção de nitrogênio total (NT) em alagados construídos de fluxo subsuperficial é limitada (SAEED; SUN, 2012; WU et al., 2014). A nitrificação é o primeiro processo limitante para a remoção de NT, uma vez que as bactérias nitrificantes dependem da disponibilidade de OD (FAN et al., 2013).

Assim, para permitir a nitrificação efetiva, a aeração artificial contínua foi implementada em alagados construídos como uma alternativa para suplementar oxigênio (BUTTERWORTH et al., 2013). Apesar da aeração artificial contínua permitir a nitrificação, as elevadas concentrações de OD fornecidas ao sistema podem alterar a condição do meio de anóxica/anaeróbia para aeróbia, inibindo o processo de desnitrificação que, conseqüentemente, limita a remoção de NT (MALTAIS-LANDRY et al., 2009; NIVALA et al., 2007).

Por outro lado, estudos recentes mostram que o uso de aeração artificial intermitente é preferível, uma vez que alterna as condições do meio entre aeróbias e anóxicas, permitindo que os processos de nitrificação e desnitrificação ocorram

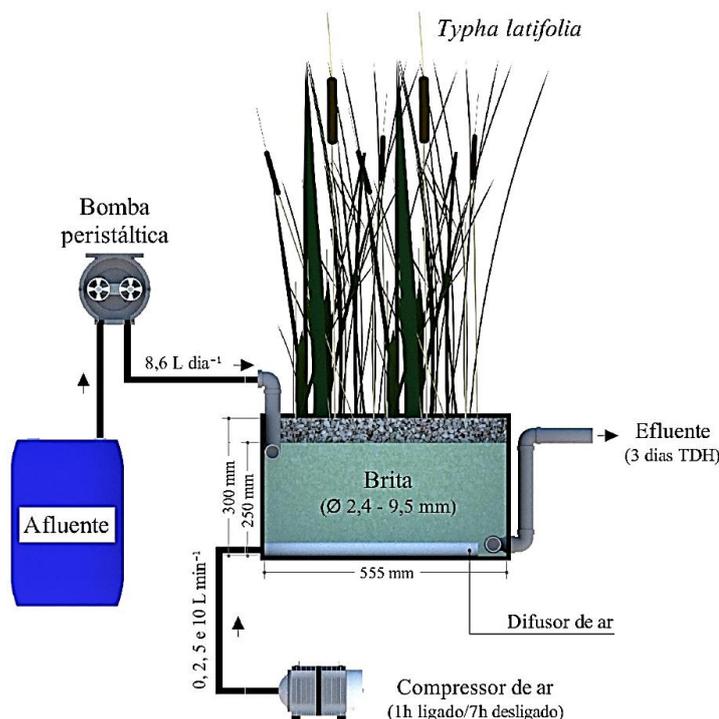
simultaneamente, aumentando a eficiência na remoção de NT (UGGETTI et al., 2016; WU et al., 2016a; LIU et al., 2019).

Entretanto, a maioria dos trabalhos avalia os efeitos da aeração intermitente em alagados construídos de fluxo subsuperficial vertical (ACFV) utilizando taxas fixas de aeração. Assim, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o efeito de diferentes taxas de aeração na remoção de NT e DQO em alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal (ACFH) aerados intermitentemente.

2 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Características do sistema de tratamento

O experimento foi realizado em ambiente protegido (estufa agrícola) no Centro de Estudos Ambientais (CEA) - UNESP, Rio Claro-SP, Brasil. O sistema de tratamento foi composto por quatro ACFH em escala piloto. Cada um dos ACFHs consistia de uma caixa d'água retangular em polipropileno com capacidade aproximada de 61 litros (31,0 x 35,5 x 55,5 cm) e, como meio suporte, utilizou-se brita #0 ($\varnothing = 2,4 - 9,5$ mm) com porosidade de 53%. As caixas d'água foram preenchidas com material suporte até a altura de 30 cm e o nível do efluente foi mantido a 25 cm, resultando em volume saturado aproximado de 26 litros. Os sistemas foram cultivados com *Typha latifolia*. A Figura 1 mostra o diagrama esquemático dos ACFHs

Figura 1. Diagrama esquemático dos alagados construídos

4.2 Taxas de aeração

Os ACFHs eram aerados intermitentemente 3 h dia⁻¹ (1h aerando/7h sem aeração) e em cada sistema foi utilizada uma diferente taxa de aeração: AC1: sem aeração (0 L min⁻¹); AC2: 2 L min⁻¹; AC3: 5 L min⁻¹; e AC4: 10 L min⁻¹. As diferentes taxas de aeração foram obtidas com o uso de compressores de ar disponíveis no mercado. O ar foi aplicado nos sistemas utilizando difusor tubular (mangueira porosa para piscicultura) instalados no fundo e ao longo da seção longitudinal das caixas de polipropileno.

4.3 Operação do sistema, origem do afluente e tempo de detenção

Os sistemas foram operados durante 250 dias consecutivos no período de 02/04/2018 a 07/12/2018. O efluente sintético era preparado utilizando água de abastecimento com a adição de 387 mg L⁻¹ de sacarose, 188 mg L⁻¹ de (NH₄)₂SO₄, 18

mg L⁻¹ de KH₂PO₄, 10 mg L⁻¹ de MgSO₄, 10 mg L⁻¹ de FeSO₄, e 10 mg L⁻¹ de CaCl₂, conforme descrito nos trabalhos de Fan et al. (2016), Wu et al. (2015a) e Wu et al. (2016a). Com o uso de bombas peristálticas, eram aplicados 8,6 L dia⁻¹ de efluente sintético nos ACFHs, resultando em 3 dias de tempo de detenção hidráulica (TDH). Ao longo dos ACFH havia pontos de coleta de amostras localizados nas distâncias de 0; 18,5; 37 e 55,5 cm da zona de entrada do afluente. Foi adotado que o TDH de cada do ponto de coleta seria proporcional à sua distância relativa ao início do ACFH e, portanto, os TDH adotados para cada ponto de coleta foram 0; 1; 2 e 3 dias, respectivamente.

4.4 Análise de amostras

Em cada ponto de coleta foram retiradas cinco amostras para determinação da concentração de DQO, NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻ e pH. As concentrações de NT foram estimadas pela somatória das demais formas

de nitrogênio. Os níveis de OD no interior dos ACFH foram determinados *in situ* utilizando medidor de OD portátil Akso (modelo: DO Eco 1.00). Todas as amostras foram coletadas, armazenadas e analisadas conforme as metodologias descritas pela American Public Health Association (2012) no período de 01/11/2018 a 07/12/2018, com exceção das determinações de OD que foram realizadas de 17/09/2018 a 21/09/2018.

4.5 Análise estatística

Os dados de DQO e NT obtidos nos ACFHs foram comparados por análise de variância (ANOVA) e a discriminação entre as médias foi realizada pelo teste de Tukey. As análises foram realizadas no programa estatístico Statgraphics (versão 16. 2. 04) e

para ambos os testes (ANOVA e Tukey) foi adotado nível de significância de 5% ($P < 0,05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Desempenho geral dos sistemas de tratamento

Na Tabela 1 são mostradas as características do afluente e do efluente dos quatro ACFH e suas respectivas eficiências de remoção. Observa-se que os sistemas com aeração intermitente (AC2-4) apresentaram elevadas eficiências de remoção. Destaca-se que as taxas de remoção de DQO, NT e NH_4^+ destes sistemas foram similares, porém superiores à do sistema sem aeração (AC1).

Tabela 1. Características do afluente e do efluente dos quatro ACFH e suas respectivas eficiências de remoção (média \pm DP, n = 5)

Parâmetro	Afluente	Efluente ACFH			
		AC1	AC2	AC3	AC4
DQO (mg L^{-1})	388,8 \pm 19,7	23,8 \pm 6,6	9,6 \pm 5,1	8,2 \pm 3,7	9,4 \pm 4,3
(%)	-	93,9 \pm 1,6	97,5 \pm 1,4	97,9 \pm 1,0	97,6 \pm 1,1
NT (mg L^{-1})	40,5 \pm 2,3	20,8 \pm 2,0	8,0 \pm 2,6	7,9 \pm 1,5	7,6 \pm 1,5
(%)	-	48,8 \pm 6,3	80,3 \pm 7,1	80,5 \pm 3,8	81,2 \pm 4,4
NH_4^+ (mg L^{-1})	39,2 \pm 2,3	16,5 \pm 1,0	0,8 \pm 0,8	0,6 \pm 0,6	0,5 \pm 0,5
(%)	-	57,7 \pm 4,5	97,8 \pm 2,2	98,4 \pm 1,6	98,6 \pm 1,4
NO_3^- (mg L^{-1})	1,4 \pm 0,3	4,3 \pm 1,6	7,0 \pm 3,0	7,2 \pm 1,3	7,0 \pm 1,3
NO_2^- (mg L^{-1})	0,004 \pm 0,002	0,02 \pm 0,01	0,09 \pm 0,18	0,10 \pm 0,14	0,05 \pm 0,07
OD (mg L^{-1})	-	0,5 \pm 0,2	1,4 \pm 0,6	2,0 \pm 1,3	2,4 \pm 1,6
pH	7,0 \pm 0,3	7,1 \pm 0,4	6,7 \pm 0,5	6,5 \pm 0,6	6,3 \pm 0,6

5.2 Concentrações de OD

Como esperado e em concordância com dados de literatura (FAN et al., 2013; FAN et al., 2016; UGGETTI et al., 2016), o AC1 apresentou condição anaeróbia com concentração média de 0,5 mg L^{-1} (faixa: 0,3-0,8). Em contrapartida, os sistemas com aeração intermitente apresentaram concentrações médias superiores de OD:

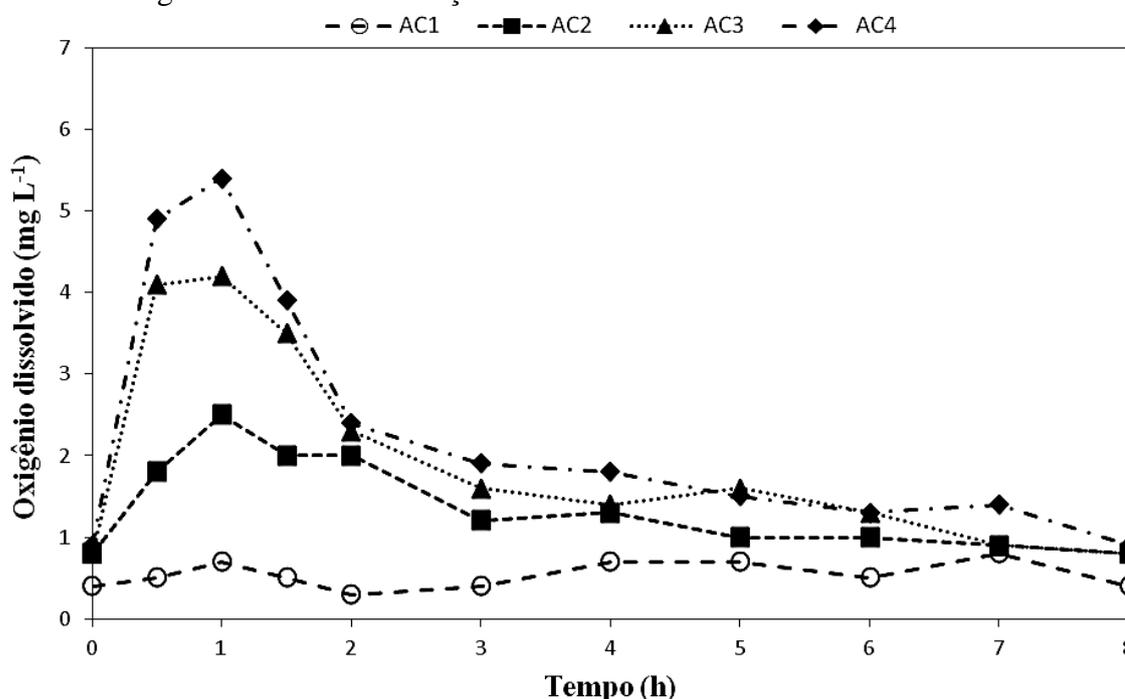
AC2 = 1,4 mg L^{-1} (faixa: 0,8-2,5); AC3 = 2,0 mg L^{-1} (faixa: 0,8-4,2); e AC4 = 2,4 mg L^{-1} (faixa: 0,9-5,4). Além disso, observa-se que nos AC2-4 o incremento nas taxas de aeração (2, 5 a 10 L min^{-1}) elevou as concentrações médias e, também, os valores máximos de OD nos sistemas.

As concentrações médias de OD dos quatro sistemas ao longo de um ciclo de aeração são mostradas na Figura 2. Durante

a aeração ocorre o aumento das concentrações de OD nos sistemas AC2-4, sendo que as concentrações máximas são obtidas ao final da fase de aeração com valores correlacionados positivamente com as taxas de aeração, ou seja, quanto maior a taxa de aeração maior a concentração de OD. Após a aeração, durante o período de 7h de repouso, ocorre a diminuição das concentrações de OD até atingir os valores mínimos observados. Perfis de OD de

alagados construídos aerados intermitentemente semelhantes também foram descritos por Fan et al. (2013) e Wu et al. (2016b). Portanto, as alterações nas concentrações de OD proporcionadas pela aeração intermitente criam condições aeróbias e anaeróbias alternadas que, conseqüentemente, facilitam a ocorrência simultânea da nitrificação e desnitrificação (FAN et al., 2012).

Figura 2. Concentrações médias de oxigênio dissolvido nos quatro alagados construídos ao longo de um ciclo de aeração



Salienta-se que os níveis de OD foram determinados a 10 centímetros de profundidade no centro dos sistemas, ou seja, sobre os difusores de ar e, portanto, as concentrações obtidas podem não representar de maneira adequada a distribuição geral de OD nos ACFHs em estudo.

5.3 Remoção de DQO

Em relação a remoção de DQO a eficiência foi maior que 90% em todos os sistemas, inclusive no AC1, entretanto os

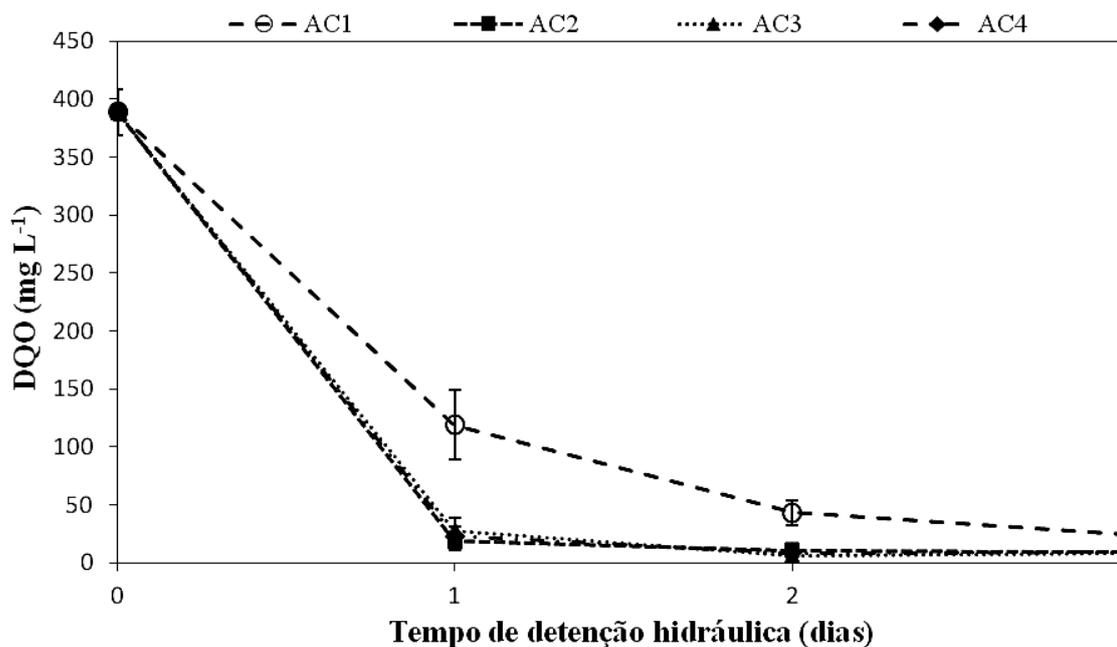
sistemas com aeração intermitente apresentaram melhor desempenho. Os AC2, AC3 e AC4 apresentaram remoção de DQO de, respectivamente, 97,5; 97,9 e 97,6%, já a remoção de DQO no AC1 foi de 93,9%. Destaca-se que as elevadas eficiências de remoção matéria orgânica obtidas no presente trabalho podem estar associadas à elevada biodegradabilidade da sacarose.

As concentrações de DQO no efluente dos AC2, AC3 e AC4 foram, respectivamente, 9,6; 8,2 e 9,4 mg L⁻¹. A maior eficiência de remoção foi obtida no AC3 (97,9%) conforme mostrado na Figura

3, a qual também revela que o incremento da taxa de aeração não causou alterações expressivas nas respectivas eficiências dos sistemas, ou seja, as eficiências dos AC2-4 foram similares (apenas 0,4% de diferença nas eficiências de remoção). Os resultados também mostram que a diferença de remoção de DQO entre o sistema não aerado e os sistemas aerados foi pequena; a concentração média de DQO no efluente do AC1 foi de $23,8 \text{ mg L}^{-1}$ e as concentrações de DQO nos ACF2-4 variaram de $9,6\text{-}8,2 \text{ mg L}^{-1}$, ou seja, uma diferença de apenas 3,6-4,3%. É sabido que ACFHs não aerados podem apresentar elevado desempenho na remoção de DQO, conforme descrito por Abou-Elela et al. (2013), Caselles-Osorio et

al. (2017) e Liu et al. (2018) que obtiveram eficiências de 91,5, 80-91, e $>85\%$, respectivamente. Assim, dependendo das condições operacionais, por exemplo, do TDH e das características do efluente, a eficiência na remoção de matéria orgânica em ACFHs não aerados pode ser semelhante à de sistemas aerados. Butterworth et al. (2013) não identificaram diferenças significativas na remoção de matéria orgânica (DBO) entre um sistema não aerado e outro aerado continuamente; e Uggetti et al. (2016) relataram diferença de apenas 1% na eficiência de remoção de DQO entre um sistema não aerado e outro aerado intermitentemente.

Figura 3. Concentrações médias de DQO nos quatro alagados construídos em relação ao tempo de detenção hidráulica



Observa-se também na Figura 3 que apesar das concentrações finais de DQO terem sido semelhantes nos quatro sistemas, houve uma clara diferença na eficiência de remoção de DQO ao longo dos sistemas. Com um dia de TDH a concentração média de DQO nos AC2-4 diminuiu para valores entre $18\text{-}27 \text{ mg L}^{-1}$ e no AC1 diminuiu para 119 mg L^{-1} , sendo que estas concentrações

correspondem, respectivamente, a 93-95% e 69% de eficiência de remoção. Esses dados são semelhantes aos relatados no trabalho de Wu et al. (2016a), no qual os autores avaliaram ACFVs e em apenas 12 horas obtiveram em sistemas aerados intermitentemente e em sistemas não aerados eficiências de remoção de DQO de, respectivamente, $>88\%$ ($<50 \text{ mg L}^{-1}$) e 76-

82% (75-100 mg L⁻¹). Estes resultados indicam, portanto, que o uso de aeração intermitente em alagados construídos aumenta a velocidade de remoção de matéria orgânica. O aumento na taxa de remoção de DQO em ACFH aerados intermitentemente pode estar associado a estímulos nas vias biológicas de remoção direta (respiração/fermentação) e à remoção de carbono orgânico no processo de desnitrificação.

Em alagados construídos a matéria orgânica pode ser oxidada biologicamente por processos aeróbios e anaeróbios (SAEED; SUN, 2012) e também pode ser removida por processos físicos, como a sedimentação e filtração (ONG et al., 2010; FAN et al., 2013). O estudo realizado por Ong et al. (2010) mostra que a adição artificial de oxigênio facilitou o crescimento de microrganismos aeróbios e intensificou a biodegradação de DQO. Adicionalmente, os autores concluíram que a combinação de condições aeróbias e anaeróbias melhora o desempenho de alagados construídos na remoção de matéria orgânica.

5.4 Remoção de nitrogênio

Segundo Saeed e Sun (2012) a transformação e remoção de nitrogênio em alagados construídos de fluxo subsuperficial ocorre tanto por rotas clássicas (amonificação, nitrificação/desnitrificação, absorção pelas plantas, assimilação pela biomassa e volatilização da amônia) quanto por rotas recentemente descobertas (nitrificação/desnitrificação parcial, ANAMMOX e processo Canon). Maltais-Landry et al. (2009) observaram que a remoção de NT está associada principalmente a quatro processos: 1) absorção pelas plantas; 2) armazenamento no sedimento; 3) nitrificação/desnitrificação parcial; e 4) nitrificação/desnitrificação completa. Porém, a nitrificação/desnitrificação completa é considerada como o principal mecanismo de

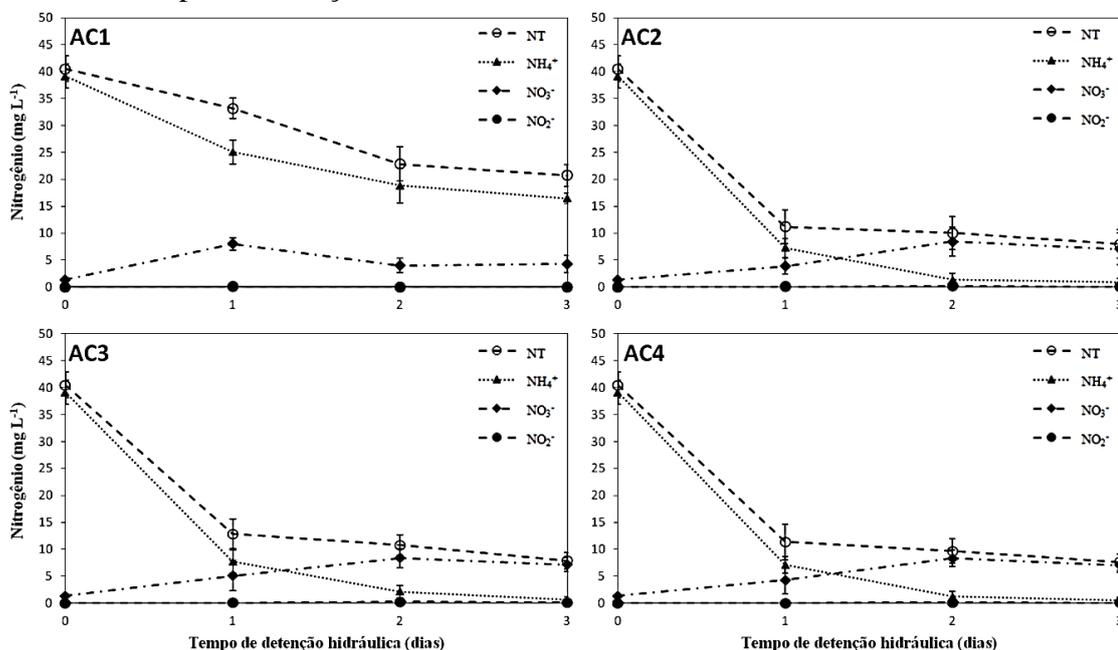
remoção de NT, sendo responsável por 47 a 96% da remoção de nitrogênio (LIN et al., 2002; MALTAIS-LANDRY et al., 2009; CHEN et al., 2014).

Em relação às plantas, alguns trabalhos sugerem que as macrófitas são responsáveis por até 34,3% da remoção de NT (MALTAIS-LANDRY et al., 2009; WU et al., 2013; CHEN et al., 2014; LIU et al., 2019). Os resultados obtidos por Maltais-Landry et al. (2009) mostram que em alagados construídos de fluxo subsuperficial aerados continuamente a espécie *Typha angustifolia* foi responsável pela remoção de aproximadamente 135 mg N m⁻² d⁻¹, valor que representa 7,6% da taxa de aplicação de nitrogênio do presente trabalho (1768 mg N m⁻² d⁻¹). Outros autores (WU et al., 2013) estimaram taxas de remoção de 40 mg N m⁻² d⁻¹ para a *Typha orientalis*, representando apenas 2,3% do nitrogênio aplicado no nosso trabalho. Portanto, na análise dos resultados obtidos no presente estudo, consideramos que a nitrificação/desnitrificação completa foi a principal rota de remoção de NT.

As remoções médias de NH₄⁺ e NT no AC1 foram de, respectivamente, 57,7% e 48,8%, confirmando que ACFHs convencionais (sem aeração) apresentam limitações na remoção de nitrogênio (WU et al., 2015a). Por exemplo, Hua et al. (2017) relataram remoções de NH₄⁺ e NT nas faixas de 20,7-66,9% e 38,1-51,6%, respectivamente, e Wu et al. (2015b) obtiveram valores de 32-61% para a remoção NH₄⁺ e de 13-44% para a remoção NT. Por outro lado, os sistemas AC2-4 apresentaram eficiências satisfatórias na remoção de NH₄⁺ (97,8-98,6%) e NT (80,3-81,2%), indicando que a aeração intermitente alterna a condição do meio entre aeróbia e anóxica que, portanto, permite a ocorrência simultânea da nitrificação e da desnitrificação. Estes achados são semelhantes aos resultados obtidos por Fan et al. (2016) e Wu et al. (2016a). Na Figura 4 é mostrada a dinâmica

de transformação de nitrogênio nos cinco alagados construídos.

Figura 4. Dinâmica de transformação de nitrogênio nos quatro alagados construídos em relação ao tempo de detenção hidráulica



Nota-se que as concentrações de NH_4^+ diminuíram rapidamente nos sistemas aerados (AC2-4), atingindo com 1, 2 e 3 dias de TDH valores menores ou iguais a 7,7, 2,1 e 1 mg L^{-1} , respectivamente. Por outro lado, o AC1 teve uma menor eficiência na remoção de NH_4^+ , com concentração final média de 16,5 mg L^{-1} . Estes resultados eram esperados, uma vez que este sistema apresentou condições anaeróbias ($\text{OD} = 0,3\text{-}0,8 \text{ mg L}^{-1}$) que, conseqüentemente, limitaram a ocorrência da nitrificação. A remoção de NH_4^+ nos sistemas aerados foi maior que 97%, corroborando com os achados de Li et al. (2014), que também quase obtiveram a remoção total de NH_4^+ em alagados construídos de fluxo subsuperficial aerados. Adicionalmente, nota-se que a remoção de NH_4^+ nos AC2-4 foi ~40% superior à remoção observada no AC1 (57,7% vs 97,8-98,6%). Similarmente, aumentos na eficiência de remoção de NH_4^+ entre sistemas aerados intermitentemente e sistemas não aerados de 46, 65 e 45-88%

foram reportados na literatura por Uggetti et al. (2016), Fan et al. (2016) e Liu et al. (2019), respectivamente. Finalmente, esses resultados mostram que a aeração artificial cria condições adequadas para a ocorrência efetiva da nitrificação em alagados construídos.

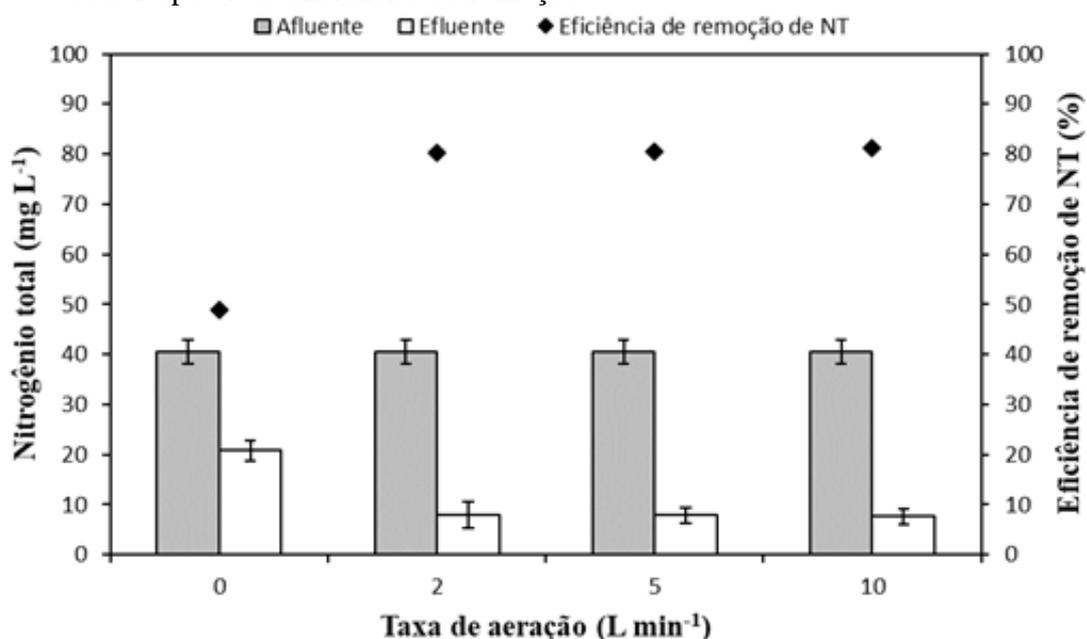
Em relação ao NT, também se nota na Figura 4 que o padrão de remoção foi similar ao padrão de remoção de NH_4^+ , ou seja, as concentrações de NT diminuíram mais rapidamente nos sistemas aerados (AC2-4). Os sistemas com aeração intermitente apresentaram menores concentrações finais (7,6-8,0 mg L^{-1}) do que o sistema não aerado (20,8 mg L^{-1}); e as eficiências médias de remoção de NT foram iguais a 48,8% no AC1, 80,3% no AC2, 80,5% no AC3 e 81,2% no AC4, portanto, esses dados mostram que os sistemas aerados intermitentemente foram 31,5-32,4% mais eficientes na remoção de NT do que o sistema sem aeração. Estes resultados são superiores aos obtidos por Uggetti et al.

(2016) (melhoria de 23%) e inferiores aos obtidos por Liu et al. (2019) (melhorias de 37 a 81%). Estes achados sugerem que o uso da aeração intermitente permitiu a ocorrência da nitrificação e desnitrificação simultânea nos alagados construídos, aumentando, assim, a eficiência de remoção de NT.

Na Figura 5 são mostradas as concentrações de NT do afluente e dos efluentes em relação às taxas de aeração e suas respectivas eficiências de remoção. Como dito anteriormente, nota-se na figura que os sistemas aerados intermitentemente apresentaram maior eficiência na remoção de NT do que o sistema não aerado. Além disso, observa-se que o incremento na taxa de aeração de 2 até 10 L min⁻¹ proporcionou aumento gradual na eficiência dos sistemas. Entretanto, de maneira similar aos dados de DQO, o incremento na taxa de aeração não causou alterações expressivas nas respectivas eficiências de remoção de NT dos sistemas, foi observada melhoria de apenas 0,9% entre o AC2 e o AC4. Diferentemente dos nossos resultados, o

trabalho de Wu et al. (2016b) indica que aumentos na taxa de aeração podem causar reduções na eficiência de remoção de NT. A diferença entre os resultados obtidos pode estar relacionada com a eficiência de transferência de oxigênio para o efluente, por exemplo, Wu et al. (2016b) utilizando taxa de aeração de 2 L min⁻¹ (taxa de aplicação de ar de 308 L m⁻³ min⁻¹) obtiveram em alagados construídos de fluxo vertical (ACFV) concentrações de OD maiores que 8 mg L⁻¹, enquanto, no presente trabalho, a taxa de aeração de 10 L min⁻¹ (taxa de aplicação de ar de 385 L m⁻³ min⁻¹) gerou concentração máxima de 5,4 mg de OD L⁻¹. Esta discrepância pode estar associada à alguns fatores como: 1) disposição espacial dos difusores de ar; 2) tamanho das bolhas liberadas pelo difusor; 3) tipo de alimentação (fluxo contínuo ou batelada); e 4) configuração dos reatores (ACFH vs ACFV). Além disso, é importante ressaltar que Wu et al. (2016b) utilizaram padrão de aeração intermitente (4h dia⁻¹) diferente do utilizado no presente trabalho (3h dia⁻¹).

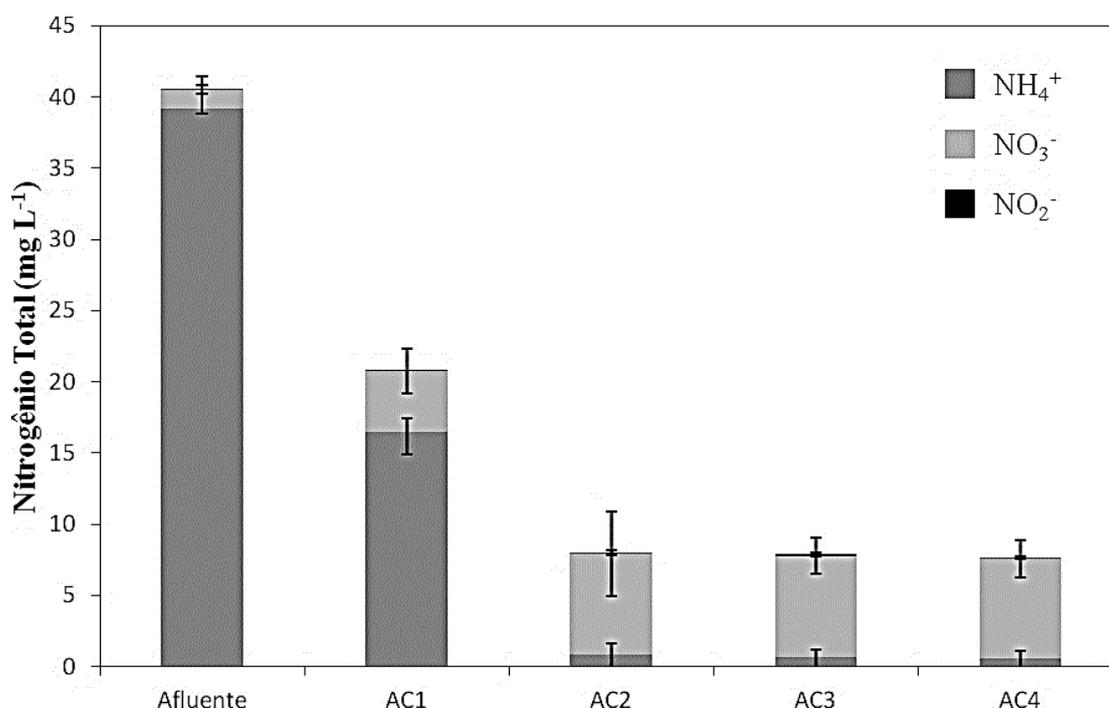
Figura 5. Concentrações de NT do afluente e dos efluentes em relação às taxas de aeração e suas respectivas eficiências de remoção



A Figura 6 mostra a composição de NH_4^+ , NO_3^- e NO_2^- do afluente e do efluente dos quatro alagados construídos. As concentrações médias de NO_2^- registradas durante a execução do experimento foram muito pequenas ($<0,3 \text{ mg L}^{-1}$), indicando que a transformação de NO_2^- para NO_3^- ocorre rapidamente. O efluente do AC1 é composto principalmente por NH_4^+ devido à nitrificação limitada. Já os efluentes dos sistemas aerados (AC2-4) são compostos quase exclusivamente por NO_3^- , indicando

que houve nitrificação efetiva. Entretanto, apesar dos dados indicarem a ocorrência simultânea da nitrificação e da desnitrificação, o acúmulo de NO_3^- nesses efluentes mostra que não ocorreu a desnitrificação completa, provavelmente, devido à falta de carbono orgânico. Wu et al. (2016a) também relataram que a deficiência de carbono impediu a completa desnitrificação do efluente em ACFV aerados intermitentemente.

Figura 6. Concentrações de NH_4^+ , NO_3^- e NO_2^- do afluente e do efluente dos quatro alagados construídos



5.1 Análise estatística

A ANOVA decompõe a variância dos parâmetros analisados em duas componentes distintas: 1) componente entre grupos. 2) componente dentro dos grupos. O índice F, que neste caso é igual a 12,35 para DQO e igual a 50,14 para NT, é a razão entre a estimativa entre grupos e a estimativa

dentro do grupo. Como o valor de P para o Teste-F é menor que 0,05 ($p < 0,0000$), existe uma diferença estatística significativa entre as médias de DQO e NT de um alagado construído para outro no nível de significância de 5%. Para determinar quais médias são significativamente diferentes das outras foi realizado o Teste de Tukey (Tabela 2).

Tabela 2. Teste de Tukey dos parâmetros DQO e NT obtidos nos quatro alagados construídos

Parâmetro	Sistema	Teste de Tukey		
		Contagem	Média	Homogeneidade*
DQO	1	20	61,93	a
	2	20	12,80	b
	3	20	13,93	b
	4	20	13,53	b
NT	1	20	25,58	a
	2	20	9,73	b
	3	20	10,50	b
	4	20	9,55	b

* Letras iguais indicam que não há diferença significativa a 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos no teste para os parâmetros DQO e NT mostram que há diferença estatística significativa entre o alagado construído sem aeração e os demais sistemas. Entretanto, o mesmo teste indica que não há diferença significativa entre os sistemas aerados, ou seja, as diferentes taxas de aeração não alteraram a eficiência de remoção de DQO e NT.

4 CONCLUSÕES

A aeração intermitente permite a ocorrência simultânea da nitrificação e da desnitrificação, aprimorando, assim, o desempenho dos ACFH na remoção de NT. Adicionalmente, ACFH aerados intermitentemente também apresentam maior taxa de remoção de DQO em relação a sistemas não aerados. Entretanto, a falta de carbono orgânico pode limitar o processo de desnitrificação em sistemas com aeração intermitente.

No presente trabalho, o incremento nas taxas de aeração não causou alterações expressivas nas eficiências de remoção de DQO e NT, provavelmente devido ao padrão de aeração adotado (1h aerando/7h sem aeração) e à baixa eficiência de transferência de oxigênio para o efluente. Finalmente, nossos resultados mostram que ACFH aerados intermitentemente apresentam elevada eficiência na remoção de DQO (>97%), NT (>80%) e NH_4^+ (>97%) e, portanto, são uma opção viável para o tratamento eficiente de águas residuárias em comunidades isoladas.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudo (processos FAPESP 17/18075-8 e 16/24526-0) e, também, pelo auxílio ao projeto de pesquisa (processo FAPESP 19/20793-1).

6 REFERÊNCIAS

ABOU-ELELA, S. I.; GOLINIELLI, G.; ABOU-TALEB, E. M.; HELLAL, M. S. Municipal wastewater treatment in horizontal and vertical flows constructed wetlands. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 61, n. 1, p. 460-468, 2013.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination for water and wastewater**. 22. ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 2012. 1496 p.

- BUTTERWORTH, E.; DOTRO, G.; JONES, M.; RICHARDS, A.; ONUNKWO, P.; NARROWAY, Y.; JEFFERSON, B. Effect of artificial aeration on tertiary nitrification in a full-scale subsurface horizontal flow constructed wetland. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 54, n. 1, p. 236-244, 2013.
- CASELLES-OSORIO, A.; VEGA, H.; LANCHEROS, J. C.; CASIERRA-MARTÍNEZ, H. A.; MOSQUERAA, J. E. Horizontal subsurface-flow constructed wetland removal efficiency using *Cyperus articulatus* L. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 99, n. 1, p. 479-485, 2017.
- CHEN, Y.; WEN, Y.; ZHOU, Q.; VYMAZAL, J. Effects of plant biomass on nitrogen transformation in subsurface-batch constructed wetlands: a stable isotope and mass balance assessment. **Water Research**, New York, v. 63, n. 1, p. 158-167, 2014.
- FAN, J. L.; LIANG, S.; ZHANG, B.; ZHANG, Z. Enhanced organics and nitrogen removal in batch-operated vertical flow constructed wetlands by combination of intermittent aeration and step feeding strategy. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 20, n. 1, p. 2448-2455, 2012.
- FAN, J. L.; ZHANG, B.; ZHANG, J.; NGO, H. H.; GUO, W. S.; LIU, F. F.; GUO, Y. Y.; WU, H. M. Intermittent aeration strategy to enhance organics and nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands. **Bioresource Technology**, Essex, v. 141, n. 1, p. 117-122, 2013.
- FAN, J.; ZHANG, J.; GUO, W.; LIANG, S.; WU, H. Enhanced long-term organics and nitrogen removal and associated microbial community in intermittently aerated subsurface flow constructed wetlands. **Bioresource Technology**, Essex, v. 214, n. 1, p. 871-875, 2016.
- HUA, Y.; PENG, L.; ZHANG, S.; HEAL, K. V.; ZHAO, J.; ZHU, D. Effects of plants and temperature on nitrogen removal and microbiology in pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands treating domestic wastewater. **Ecological Engineering**, Oxford, v. 108, n. 1, p. 70-77, 2017.
- LI, F.; LU, L.; ZHENG, X.; NGO, H. H.; LIANG, S.; GUO, W.; ZHANG, X. Enhanced nitrogen removal in constructed wetlands: effects of dissolved oxygen and step-feeding. **Bioresource Technology**, Essex, v. 169, n. 1, p. 395-402, 2014.
- LIN, Y. F.; JING, S. R.; WANG, T. W.; LEE, D. Y. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands. **Environmental Pollution**, Barking, v. 119, n. 3, p. 413-420, 2002.
- LIU, F. F.; FAN, J.; DU, J.; SHI, X.; ZHANG, J.; SHEN, Y. Intensified nitrogen transformation in intermittently aerated constructed wetlands: Removal pathways and microbial response mechanism. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 650, n. 1, p. 2880-2887, 2019.
- LIU, X.; ZHANG, Y.; LI, X.; FU, C.; SHI, T.; YAN, P. Effects of influent nitrogen loads on nitrogen and COD removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands during

different growth periods of *Phragmites australis*. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 635, n. 1, p. 1360-1366, 2018.

MALTAIS-LANDRY, G.; MARANGER, R.; BRISSON, J.; CHAZARENCO, F. Nitrogen transformation and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands. **Water Research**, New York, v. 43, n. 1, p. 535-545, 2009.

NIVALA, J.; HOOS, M. B.; CROSS, C.; WALLACE, S.; PARKIN, G. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 380, n. 1, p. 19-27, 2007.

ONG, S. A.; UCHIYAMA, K.; INADAMA, D.; ISHIDA, Y.; YAMAGIWA, K. Performance evaluation of laboratory scale up-flow constructed wetlands with different designs and emergent plants. **Bioresource Technology**, Essex, v. 101, n. 1, p. 7239-7244, 2010.

SAEED, T.; SUN, G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. **Journal of Environmental Management**, London, v. 112, n. 1, p. 429-448, 2012.

UGGETTI, E.; HUGHES-RILEY, T.; MORRIS, R. H.; NEWTON, M. I.; TRABI, C. L.; HAWES, P.; PUIGAGUT, J.; GARCÍA, J. Intermittent aeration to improve wastewater treatment efficiency in pilot-scale constructed wetland. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 559, n. 1, p. 212-217, 2016.

WU, H.; FAN, J.; ZHANG, J.; NGO, H. H.; GUO, W.; LIANG, S.; LV, J.; LU, S.; WU, W.; WU, S. Intensified organics and nitrogen removal in the intermittent-aerated constructed wetland using a novel sludge-ceramsite as substrate. **Bioresource Technology**, Essex, v. 210, n. 1, p. 101-107, 2016a.

WU, H.; FAN, J.; ZHANG, J.; NGO, H. H.; GUO, W.; HU, Z.; LV, J. Optimization of organics and nitrogen removal in intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: Effects of aeration time and aeration rate. **International Biodeterioration and Biodegradation**, Barking, v. 113, n. 1, p. 139-145, 2016b.

WU, H.; FAN, J.; ZHANG, J.; NGO, H. H.; GUO, W.; HU, Z.; LIANG, S. Decentralized domestic wastewater treatment using intermittently aerated vertical flow constructed wetlands: impact of influent strengths. **Bioresource Technology**, Essex, v. 176, n. 1, p. 163-168, 2015a.

WU, S.; LEI, M.; LU, Q.; GUO, L.; DONG, R. Treatment of pig manure liquid digestate in horizontal flow constructed wetlands: Effect of aeration. **Engineering in Life Sciences**, Weinheim, v. 16, n. 3, p. 263-271, 2015b.

WU, S.; KUSCHK, P.; BRIX, H.; VYMAZAL, J.; DONG, R. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: a nitrogen and organic matter targeted review. **Water Research**, New York, v. 57, n. C, p. 40-55, 2014.

WU, H.; ZHANG, J.; WEI, R.; LIANG, S.; LI, C.; XIE, H. Nitrogen transformations and balance in constructed wetlands for slightly polluted river water treatment using different macrophytes. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 20, n. 1, p. 443-451, 2013.