

II-535 - REMOÇÃO DE NITROGÊNIO EM *WETLANDS* CONSTRUÍDOS: DESEMPENHO DE SISTEMAS INTENSIFICADO E HÍBRIDO TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO

Helisson H. Borsato de Andrade⁽¹⁾

Tecnólogo em Gerenciamento Ambiental pela UTFPR. Mestrado em Engenharia Civil PPGEC/UTFPR. Doutorando em Sustentabilidade EACH/USP.

Neildes Santana⁽¹⁾

Bióloga pela UFBA. Mestra em Ecologia e Biomonitoramento UFBA. Doutoranda em Sustentabilidade EACH/USP.

Roque P. Piveli

Engenheiro civil (EESC/USP). Doutor em Engenharia Hidráulica e Sanitária pela (EP/USP). Professor titular do DHS da Escola Politécnica (EP/USP).

Marcelo A. Nolasco⁽¹⁾

Biólogo pela UFSCAR. Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Professor Associado e orientador credenciado nos Programas de Pós-graduação em Sustentabilidade (EACH/USP) e no Mestrado Ambiente, Saúde e Sustentabilidade (FSP/USP).

Endereço⁽¹⁾: Escola de Artes, Ciências e Humanidades Universidade de São Paulo Av. Arlindo Béttio, 1000 Ermelino Matarazzo São Paulo-SP CEP:03828-000 - Brasil - Tel:+55(11)2648-0071-e-mail: helissonborsato@gmail.com

RESUMO

Os sistemas de tratamento por wetlands construídos (WC), são considerados como uma alternativa para adequação de esgotos sanitários, de origem domiciliar. Tais tecnologias tem como características eficiências elevadas na remoção de matéria orgânica e baixos custos operacionais. Todavia, de acordo com o modelo de sistema adotado pode se apresentar diferentes eficiências e formas químicas no que toca a qualidade final em termos de nutrientes. O presente artigo tem como objetivo avaliar a remoção as diferentes formas de nitrogênio encontradas, bem como a remoção de nitrogênio total em dois sistemas de wetlands construídos para tratamento de esgoto sanitário, sendo um sistema intensificado com etapa aerada e outro sistema híbrido vertical mais horizontal, ambos precedido por tanque séptico. A eficiência na remoção de matéria orgânica em termos de DQO foi de 91,2% na saída do sistema intensificado (Sistema 1) e 85,3% na saída do híbrido (Sistema 2). Os resultados finais de eficiência de remoção de N-total foram de 51% para o Sistema 1 e de 38,2% para o sistema 2.

PALAVRAS-CHAVE: Esgoto sanitário, remoção de nitrogênio, sistema descentralizado, *wetland* construído híbrido, *wetland* construído intensificado

INTRODUÇÃO

Os *wetlands* construídos (WC) são sistemas de tratamento de águas residuárias, que recriam artificialmente o meio natural (áreas húmidas naturais), que de modo geral sigam três critérios: a) Presença de macrófitas aquáticas; b) Presença de meio líquidos constante (sistemas saturados) ou periódico; e c) Fluxo de água (residuária) visando a melhoria na qualidade (FONDER; HEADLEY, 2013).

Os WC têm se tornando uma alternativa cada vez mais pesquisada e aplicada para os lançamentos provenientes de comunidades e habitações devido à sua eficiência mesmo em condições de variação de taxas de aplicação, com grande potencial de utilização nos países em desenvolvimento em que predominam baixos níveis de atendimento pelos serviços de saneamento. (BRIX, 1997; VYMAZAL, 2011; WU et al., 2014).

Estes sistemas são obras de engenharia que para alcançar a eficiência de funcionamento, tanto na sua concepção quanto na operação, deve-se considerar uma gama de critérios técnicos, como por exemplo, a capacidade do sistema (taxas de aplicação, cargas orgânicas e de nutrientes), as espécies de plantas utilizadas, características de colonização de certos grupos de microrganismos, possíveis interações de compostos

biogênicos e contaminantes que podem apresentar toxicidade a planta ou microrganismos, consequentemente afetando o funcionamento (STOTTMEISTER et al., 2003).

Dentre os nutrientes de interesse no tratamento de águas residuárias o nitrogênio pode ser encontrado em águas residuárias em sua forma orgânica, através de ureia, proteínas e aminoácidos, bem como em formas inorgânicas, como em formas reduzidas amônio e amônia (NH_4 e NH_3), nitrato (NO_3) ou oxidada como o nitrito (NO_2) (TCHOBANOQLOUS; BURTON; STENSEL, 2002).

As vias de transformação nos sistemas de WC podem ser diversificadas e muito se tem estudado a respeito nos últimos anos. O fato é que sua transformação é mediada pela atividade biológica, logo, a chave para compreensão está na identificação não apenas nos compostos formados mas também nos microrganismos envolvidos (SAEED; SUN, 2012).

A rota clássica da remoção de nitrogênio, biologicamente é composta pelos processos de amonificação de materiais nitrogenados através da decomposição de tecidos de plantas e animais, seguido pela nitrificação onde a amônia é oxidada e o produto final é o nitrato (NO_3^-), que posteriormente é reduzido a gás nitrogênio (N_2). Estes processos são mediados por microrganismos e enzimas específicas em cada etapa (LEE; FLETCHER; SUN, 2009).

O processo de nitrificação é realizado pelos microrganismos autótrofos quimiossintetizantes que obtêm energia por meio da oxidação de um substrato inorgânico como a amônia. A transformação da amônia em nitrito é realizada por bactérias do gênero *Nitrossomonas*. A conversão do nitrito em nitrato é realizada por bactérias do gênero *Nitrobacter* (WONG; BARTON; BARFORD, 2003).

O processo de nitrificação é realizado pelos microrganismos autótrofos quimiossintetizantes que obtêm energia por meio da oxidação de um substrato inorgânico como a amônia, a oxidação é realizada por bactérias do gênero *Nitrossomonas* e *Nitrosococcus* para nitrito e *Nitrospira* para nitrato (WONG; BARTON; BARFORD, 2003).

Alguns fatores ambientais podem limitar a nitrificação tais como: (i) Relação carbono/nitrogênio: a taxa de nitrificação decresce a medida que a relação C/N aumenta, tendo como limite C/N=16 (HU et al., 2009); (ii) Temperatura: valores ótimos para o crescimento das bactérias nitrificantes estão entre 28°C a 36°C; (iv) pH: valores ótimos de pH para as *Nitrossomonas* e *Nitrobacter* encontram-se entre 7 e 9 (AHN, 2006; WARD; ARP; KLOTZ, 2011); e (v) Oxigênio dissolvido (OD): concentrações de OD < 2,5mg.L⁻¹ tendem a reduzir significativamente o processo tendo como limite OD = 0,5 mg.L⁻¹ (STENSTROM; SONG, 1991).

Nitrito e nitrato atuam como aceptor de elétrons, existem dois tipos de desnitrificação: autotrófica, que é realizada pelos microrganismos que usam fonte de carbono inorgânico para seu crescimento; e heterotrófica, na qual os microrganismos utilizam carbono orgânico como doador de elétrons. A remoção de nitrito e nitrato pode acontecer simultaneamente com oxidação do carbono orgânico presente nos efluentes domésticos (WONG; BARTON; BARFORD, 2003).

A desnitrificação produz gás nitrogênio (N_2), óxido nitroso (N_2O) ou óxido nítrico (NO) e realizado por grupos de bactérias que incluem *Bacillus*, *Enterobacter*, *Micrococcus*, *Pseudomonas* e *Spirillum*, *Proteus*, *Aerobacter* e *Flavobacterium* apenas reduz o NO_3^- a NO_2^- (LEE; FLETCHER; SUN, 2009).

O processo de desnitrificação corresponde à redução do nitrato a gás nitrogênio, o qual ocorre em baixas concentrações de oxigênio. Nitrito e nitrato atuam como aceptor de elétrons, existem dois tipos de desnitrificação: autotrófica, que é realizada pelos microrganismos que usam fonte de carbono inorgânico para seu crescimento; e heterotrófica, na qual os microrganismos utilizam carbono orgânico como doador de elétrons. A remoção de nitrito e nitrato pode acontecer simultaneamente com oxidação do carbono orgânico presente nos efluentes domésticos (WONG; BARTON; BARFORD, 2003).

Algumas vias alternativas de remoção biológica de nitrogênio tem sido descritas em literatura como tais como: Sharon (*Single reactor for high activity ammonium removal over nitrite*), Babe (*Bio-augmentation batch enhanced*), Canon (*Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite*), Anammox (*Anaerobic ammonium*

oxidation) e Deammox (*Denitrifying ammonium oxidation*), recentemente algumas destas vias têm sido relatadas em sistemas de *wetlands* construídos (BERTINO, 2010; SAEED; SUN, 2012; DING et al., 2014).

As pesquisas ainda não demonstraram a ocorrência de apenas uma dessas vias de maneira preferencial nos WC, contudo, algumas já foram relatadas por meio da identificação dos microrganismos envolvidos no processo, as formas de remoção relatadas incluem desnitrificação parcial, nitrificação e desnitrificação simultânea, Anammox e processo Canon, (SAEED; SUN, 2012; WU et al., 2015b).

O presente artigo visa demonstrar a remoção as diferentes formas de nitrogênio encontradas, bem como a remoção de nitrogênio total em dois sistemas de *wetlands* construídos para tratamento de esgoto sanitário, sendo um sistema intensificado com etapa aerada e outro sistema híbrido vertical mais horizontal, ambos precedido por tanque séptico.

MATERIAL E MÉTODOS

Os pilotos foram montados no CTH-Poli (Centro de Tecnologia Hidráulica da Escola Politécnica) na USP campus Butantã, São Paulo, SP, operando com esgoto sanitário pré-tratado por peneiramento e caixa de areia, oriundo da moradia estudantil com contribuição do restaurante universitário localizado dentro das dependências da universidade.

Os sistemas monitorados (Figura 1) foram, *Sistema 1*: Tanque séptico, *wetland* construído aerado de fluxo livre, decantador e *wetland* de fluxo subsuperficial vertical saturado; *Sistema 2*: Tanque séptico e *wetland* híbrido vertical + horizontal.



Figura 1 – Desenho esquemático dos sistemas monitorados.

O tanque séptico foi dimensionado para o atendimento dos dois protótipos, o controle de vazão foi dado por bomba centrífuga submersa instalada a montante e a jusante do mesmo com aplicações controladas por temporizador.

Na Tabela 1 a seguir são descritas a medidas e vazões aplicadas em cada sistema.

Tabela 1: Dimensões e Vazões de Operação

Sistemas	Módulo	Vazão Média (m ³ /dia)	Área Útil (m ²)	Altura Útil (m)	Volume Útil* (m ³)	TDH** (Horas)
Pré-tratamento	Tanque Séptico	2,3	-	-	5	66,7
	WC Aerado		0,50	1,3	0,65	14,3
Sistema 1	Decantador	1,5	0,24	1,15	0,28	6,2
	WC Subsuperficial		4,90	1	2,12	46,6
Sistema 2	WC híbrido vertical	0,8	3,6	0,95	1,3	~19
	WC híbrido horizontal		3,6	0,5	0,64	19

* Considerando a porosidade do meio filtrante

** TDH = Tempo de detenção hidráulico teórico

As plantas cultivadas foram, o *Cyperus* spp. (mini papiros) no módulo WC aerado sobre uma plataforma flutuante, a *Canna generalis* (canna indica) no WC de fluxo *subsuperficial* do Sistema 1, para o Sistema 2 foi utilizado a *Vetiveria zizanioides* (capim vetiver) tanto na parte vertical quanto no de fluxo horizontal.

RESULTADOS

Os dados apresentados nesta sessão são referentes ao monitoramento ambos sistemas, entre os períodos de 8/03/2016 a 20/10/2016, sendo que o Sistema 1 foi construído no início de 2016 e o Sistema 2 já operava desde novembro de 2014.

Os pilotos foram operados com cargas orgânicas médias de 58,1gDQO/m².dia para o Sistema 1 e 14,6gDQO/m².dia para o Sistema 2, e os dados apresentados foram obtidos em monitoramento semanal com amostragem simples em cada ponto (Tabela 2).

Tabela 2: Valores médios para o período amostral em cada ponto de coleta.

Parâmetros	Pontos											
	Bruto		TS		A		D		WC		Wetland Híbrido	
	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP
OD (mg/L)	1,4	0,8	0,5	0,2	2,4	1,6	1,1	1,0	0,7	0,8	0,6	0,3
Temp. (°C)	22,3	5,0	21,8	3,3	20,1	4,8	19,9	3,7	19,3	4,5	19,9	3,4
pH	7,5	0,7	7,2	0,3	7,4	0,4	7,4	0,2	7,4	0,2	7,3	0,2
DQO (mg/L)	967,1	486,8	768,1	1326,9	400,8	345,1	200,9	107,2	76,4	39,2	108,5	136,0
Efic. DQO (%)			19,4	116,7	57,6	31,0	77,0	13,0	91,2	5,6	85,3	13,0
N-NO ₃ (mg/L)	0,2	0,2	0,5	0,8	4,5	6,9	1,9	3,2	1,0	2,0	0,9	1,1
N-NO ₂ (mg/L)	1,4	1,0	1,7	1,7	8,5	14,4	4,2	7,2	1,5	1,2	1,7	1,4
N-NH ₄ (mg/L)	52,3	20,4	41,9	19,5	36,1	17,8	35,6	16,9	30,2	14,1	37,5	21,2
N-total (mg/L)	80,9	18,0	67,6	21,6	61,5	21,3	48,1	17,6	38,5	13,0	49,2	18,9
Efic. N-Total (%)			15,3	17,1	22,4	21,0	39,0	20,5	51,0	15,9	38,2	20,9

Pontos: Bruto, esgoto sanitário pré-tratado anterior ao tanque séptico; TS, efluente coletado na saída do tanque séptico; A, Coletado no WC aerado (Sistema 1); D, Coletado no decantador (Sistema 1); WC: Após passagem pelo WC subsuperficial vertical (Sistema 1); Wetland Híbrido, após a passagem pelo WC híbrido (Sistema 2).

M= Média

DP= Desvio Padrão

As concentrações de oxigênio dissolvido nas etapas de tratamento são apresentadas na Tabela 2. Nesta destaca-se as concentrações mais elevadas na entrada (Bruto) possivelmente relacionadas à incorporação de oxigênio pelo turbilhonamento inerente a descarga na caixa de passagem a partir da estação elevatória, e no ponto “A” devido a aplicação de ar comprimido nesta etapa.

A combinação de fase aeróbia no ponto “A” e fase anaeróbia no WC visa induzir a remoção de nitrogênio pela oxidação de NH_4 seguida pela redução de NO_2 e NO_3 em ambiente anóxico (WU et al., 2016).

É possível destacar a elevada eficiência na remoção de matéria orgânica em termos de DQO 91,2% na saída do Sistema 1 (WC) e 85,3% na saída do Sistema 2. Com concentrações finais médias de DQO=76,4mg/L para a saída do sistema intensificado e DQO=108,5 mg/L para o sistema híbrido (Figura 1).

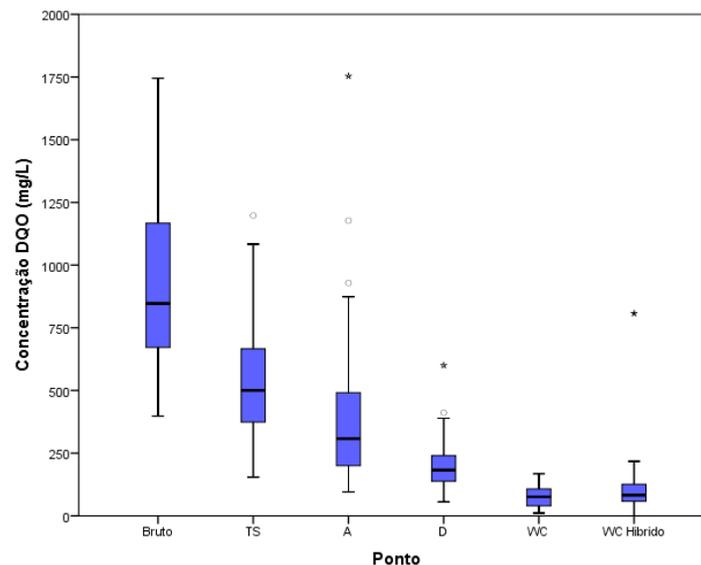


Figura 1 - Boxplot da concentração de DQO nos pontos amostrais.

Os sistemas operados têm como diferencial mais significativo (além do design construtivo) a etapa aerada artificialmente, que mantém no ponto “A” as concentrações de oxigênio mais elevadas, esta etapa foi incluída visando a oxidação de matéria orgânica e nitrogenada. É possível observar na Figura 2 a diferença percentual entre formas mais oxidadas de nitrogênio (NO_2 e NO_3) no ponto A do Sistema 1 devido principalmente a aeração artificial neste ponto.

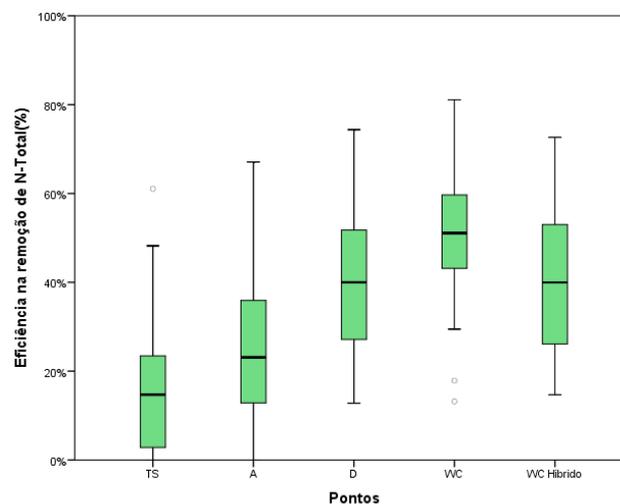


Figura 2 - Boxplot das eficiências de remoção de N-total nos pontos amostrais.

WU et al., (2015) operando WC de fluxo subsuperficial em escala de bancada com aeração intermitente obteve eficiências em torno entre 65,7 e 89,2% na remoção de N-Total. Os dados máximos obtidos para o sistema 1 foram de 81% com média de 51±13% de remoção de nitrogênio, todavia deve-se considerar a variação de carga aplicada e a toxicidade do esgoto real.

Os resultados finais de eficiência de remoção de N-total foram de 51% para o Sistema 1 e de 38,2% para o sistema 2. Uggetti et al., (2016) obteve 77% com sistema de aeração intermitente e carga de 8,5 gDQO/m².dia.

Na Figura 3 é possível observar a formação de espécies oxidadas de nitrogênio no ponto “A” onde a concentração média de N-NO₃ foi de 6,9±2,3 mg/L e de N-NO₂ foi de 4,5±6,9 mg/L. Esse fato pode estar relacionado a concentração de oxigênio nesta etapa e o possível desenvolvimento de bactérias que atuam na oxidação no nitrito e nitrato

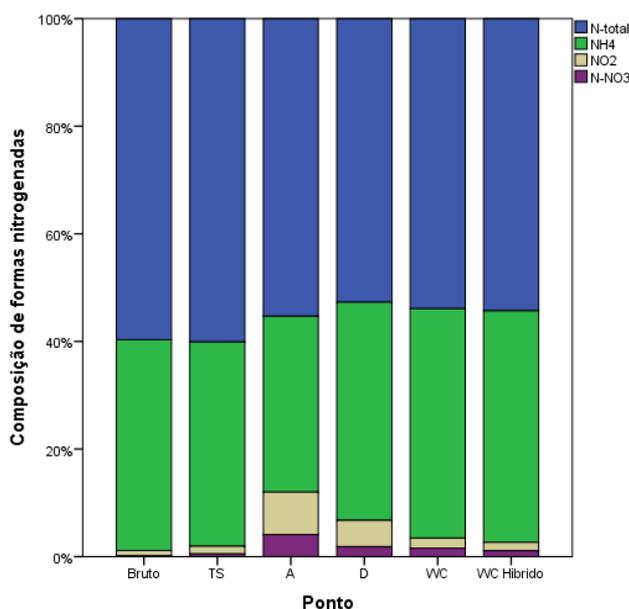


Figura 3 - Composição média das formas nitrogenadas em cada ponto do sistema.

Em um balanço de massa em WC realizado por (LIU et al., 2014) foi reportado que a maior fração de nitrogênio removida seria pela desnitrificação variando entre 54 e 94% do nitrogênio total removido, seguido pela absorção pelas plantas com 7 a 14,13% e sedimentação entre 1 e 46%.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No tocante a remoção de nitrogênio dos sistemas de WC aerados artificialmente os resultados têm indicado um desempenho bastante favorável, com ressalvas aos sistemas de único modulo aerado de maneira continua, fato que limita a remoção de nitrogênio total pela ausência de fase anóxica.

Os sistemas com aeração intermitente (ou com etapa areada em separado) apresentam em alguns estudos entre 90% na remoção de nitrogênio amoniacal e 80% de nitrogênio total (FAN et al., 2013), chegando até a valores acima de 90%, conforme demonstrado por Hu et al., (2012), tais estudos realizados escalas laboratoriais com maiores condições de controle.

As maiores eficiências tanto em termos de remoção de DQO, quanto de matéria nitrogenada no sistema intensificado frente ao sistema híbrido está atrelada principalmente ao incremento da aeração, este fato auxilia sua implantação em locais onde as características do efluente final são mais restritivas, todavia requer mais gastos energéticos e operacionais no sistema.

A obtenção dos valores reportados nesta pesquisa mesmo em condições reais clima e de elevada carga orgânica de aplicação indicam o potencial da aplicação da areação nos sistemas de *wetlands* construídos, visando não apenas a remoção de nitrogênio, mas também a redução da área de demanda para construção fator que pode afetar significativamente o custo de implantação da tecnologia. Outros aspectos ainda precisam ser melhores explorados tais como a gestão do lodo produzido pela areação e custo envolvido neste processo, e a vida útil do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHN, Y. H. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review. **Process Biochemistry**, v. 41, n. 8, p. 1709–1721, 2006.
2. BERTINO, A. Study on One -Stage Partial Nitritation - Anammox Process in Moving Bed Biofilm Reactors : a Sustainable Nitrogen R Emoval. n. December, p. 193, 2010.
3. BRIX, H. Do Macrophytes Play a Role in Constructed Treatment Wetlands? **Water Science Technology**, v. 35, n. 5, p. 11–17, 1997.
4. DING, Y.; WANG, W.; SONG, X.-S.; WANG, G.; WANG, Y.-H. Effect of spray aeration on organics and nitrogen removal in vertical subsurface flow constructed wetland. **Chemosphere**, v. 117, n. 2, p. 502–5, dez. 2014.
5. FAN, J.; ZHANG, B.; ZHANG, J.; NGO, H. H.; GUO, W.; LIU, F.; GUO, Y.; WU, H. Intermittent aeration strategy to enhance organics and nitrogen removal in subsurface flow constructed wetlands. **Bioresource Technology**, v. 141, p. 117–122, 2013.
6. FONDER, N.; HEADLEY, T. The taxonomy of treatment wetlands: A proposed classification and nomenclature system. **Ecological Engineering**, v. 51, p. 203–211, fev. 2013.
7. HU, J.; LI, D.; LIU, Q.; TAO, Y.; HE, X.; WANG, X.; LI, X.; GAO, P. Effect of organic carbon on nitrification efficiency and community composition of nitrifying biofilms. **Journal of Environmental Sciences**, v. 21, n. 3, p. 387–394, 2009.
8. HU, Y.; ZHAO, Y.; ZHAO, X.; KUMAR, J. L. G. High rate nitrogen removal in an alum sludge-based intermittent aeration constructed wetland. **Environmental Science and Technology**, v. 46, p. 4583–4590, 2012.
9. LEE, C. G.; FLETCHER, T. D.; SUN, G. Nitrogen removal in constructed wetland systems. **Engineering in Life Sciences**, v. 9, n. 1, p. 11–22, 2009.
10. 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**, v. 112, p. 429–48, 15 dez. 2012.
11. STENSTROM, M. K.; SONG, S. S. Effects nitrification of oxygen in the transport activated limitation sludge on process. **Water Environment Federation**, v. 63, n. 3, p. 208–219, 1991.
12. STOTTMEISTER, U.; WIESSNE, A.; KUSCHK, P.; KAPPELMEYER, U.; KÄSTNER, M.; BEDERSKI, O.; MÜLLER, R. a.; MOORMANN, H. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. **Biotechnology Advances**, v. 22, n. 1–2, p. 93–117, dez. 2003.
13. TCHOBANOQLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater engineering treatment and reuse**. [s.l: s.n.]
14. 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**, v. 559, p. 212–217, 2016.
15. VYMAZAL, J. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. **Hydrobiologia**, v. 674, p. 133–156, 2011.
16. WARD, B. B.; ARP, D. J.; KLOTZ, M. G. **Nitrification**. Washington, D.C.: ASM Press, 2011.
17. WONG, C. H.; BARTON, G. W.; BARFORD, J. P. The nitrogen cycle and its application in Wastewater treatment. **Water and Wastewater Microbiology**, p. 427–438, 2003.
18. 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**, p. 1–7, 2015a.
19. 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**, v. 210, p. 101–107, 2016.
20. WU, H.; ZHANG, J.; HAO, H.; GUO, W.; HU, Z.; LIANG, S.; FAN, J. *Bioresource Technology A*

- review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment : Design and operation. **Bioresource Technology**, v. 175, p. 594–601, 2015b.
21. 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**, v. 57, p. 40–55, 15 jun. 2014.