UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

O EFEITO DE DIFERENTES TAXAS DE APLICAÇÃO DE OXIGÊNIO NA REMOÇÃO DE NT E DQO EM ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE FLUXO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL COM AERAÇÃO INTERMITENTE

Gabriela Barbosa da Costa

Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro (SP)

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

GABRIELA BARBOSA DA COSTA

EFEITO DE DIFERENTES TAXAS DE APLICAÇÃO DE OXIGÊNIO NA REMOÇÃO DE NT E DQO EM ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE FLUXO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL COM AERAÇÃO INTERMITENTE

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP
2021

C837e

Costa, Gabriela Barbosa da

Efeito de diferentes taxas de aplicação de oxigênio em alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal com aeração intermitente / Gabriela Barbosa da Costa. -- Rio Claro, 2021

30 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Marcelo Loureiro Garcia

Coorientador: João Gabriel Thomaz Queluz

1. Alagados construídos. 2. DQO. 3. NT. 4. Aeração intermitente. 5. Balanço hídrico. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

GABRIELA BARBOSA DA COSTA

EFEITO DE DIFERENTES TAXAS DE AERAÇÃO NA REMOÇÃO DE NITROGÊNIO TOTAL E DQO EM ALAGADOS CONSTRUÍDOS DE FLUXO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL AERADOS INTERMITENTEMENTE

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Dr. João Gabriel Thomaz Queluz

Dra. Lauren Nozomi Marques Yabuki

Rio Claro, 22 de fevereiro de 2021.

Gabriela Barbosa da Costa

Assinatura da aluna

Assinatura do orientador

RESUMO

Dados da literatura sobre alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal com aeração contínua mostram a eficiência na remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos suspensos totais (SST). Entretanto, a remoção de nitrogênio total (NT) é insatisfatória. Este índice pode ter uma melhor performance ao implementar o processo de nitrificação de desnitrificação simultâneas no sistema. Tal processo é obtido utilizando a aeração intermitente. Portanto, o objetivo da presente pesquisa é avaliar o efeito de diferentes taxas de aeração na remoção de DQO e NT em alagados construídos com fluxo subsuperficial horizontal aerados intermitentemente. Foram estudados cinco alagados, sendo a dinâmica de aeração feita em 3 aerações diárias, com duração de uma hora, utilizando diferentes taxas de aplicação de oxigênio: 0, 2, 5, 10, 20 $L.min^{-1}$. Os alagados receberam uma vazão diária de 8,7 L de água residuária doméstica sintética, resultando em tempo de detenção de 3 dias. De cada alagado construído foram avaliados os seguintes parâmetros: DQO, oxigênio dissolvido, pH, NT, nitrato, nitrito, fósforo total, condutividade elétrica, temperatura e vazão.

O balanço hídrico dos sistemas foi realizado com o intuito de determinar a evapotranspiração dos alagados construídos. Os valores de evapotranspiração variaram entre 1 a 39,1 $mm.dia^{-1}$, com uma média de 21,5 mm dia^{-1}, e tais valores estão de acordo com a literatura. Além disso, conclui-se que a evapotranspiração não é influenciada pela a aeração no sistema.

Após uma análise aprofundada dos resultados junto à estatística, foi possível determinar que a aeração tem papel fundamental na melhora da remoção de nitrogênio e DQO nos sistemas. Entretanto, as diferentes taxas de aeração neste caso, não se mostraram decisivas para tal feito, e sim estatisticamente suficientes para um desempenho bom e similar. Nota-se que a eficiência dos parâmetros em questão, em DBO o desempenho é 3% superior nos alagados construídos com aeração intermitente quando comparados ao sem aeração, numa porcentagem média 97,5% a 98,24% de eficiência nos sistemas aerados. Já o NT teve uma eficiência 30% superior nos alagados com aeração, atingindo uma média de 80% a 83,6% de eficiência de remoção.

Palavras-chave: Alagados Construídos, DQO, NT, Aeração Intermitente.

ABSTRACT

Literature data about horizontal subsurface flow constructed wetlands with continuous aeration proves efficiency in the removal of biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD) and total suspended solids (TSS). However, the removal of total nitrogen (NT) is unsatisfactory. This index can be improved through the simultaneous nitrification and denitrification process, which in turn can be obtained using intermittent aeration. Therefore, the objective of the present research is to evaluate the effect of different aeration rates on COD and TN removal in five constructed wetlands with horizontal subsurface flow, intermittently aerated for 1 hour three times a day. Each constructed wetland will be evaluated using different oxygen application rates: 0, 2, 5, 10 and 20 $L.min^{-1}$. Wetlands will receive a daily flow of 8.7 L of synthetic domestic wastewater, with an hydraulic retention time of 3 days. The following parameters will be evaluated: COD, dissolved oxygen, pH, TN, nitrate, nitrite, total phosphorus, electrical conductivity, temperature and flow rate.

In addition, the water balance of the systems was carried out in order to determine the evapotranspiration of the wetland. The results range into 1.015 to 39.081 and the mean value is 21.5 mm day^{-1}. Those values are similar to the literature about wetlands. Furthermore, it is concluded that the evapotranspiration isn't influenced by aeration in the system.

The water balance of the systems was carried out in order to determine the evapotranspiration of the wetlands constructed. Evapotranspiration values ranged from 1 to 39.1 mm day^{-1}, with a mean of 21.5 mm day^{-1}, and those values agree with the literature. In addition, it is concluded that evapotranspiration is not influenced by aeration in the system.

After an analysis of the results with and statistic conclusions, it was possible to determine that aeration plays a main role in the improvement of nitrogen and COD removal in the systems. However, the different aeration rates in this case were not decisive for this purpose, but statistically enough for good and similar performance. Regarding the analysis of the efficiency of the parameters, the COD removal had a 3% higher performance in the wetlands with intermittent aeration when compared to the non-aerated system, in a mean percentage of 97.5% to 98.24% efficiency. The NT also had a 30% higher efficiency in the aerated wetlands, reaching an average of 80% to 83.6% of removal.

Keywords: Constructed wetlands, COD, TN, Intermittent Aeration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alagados construídos utilizados.

Figura 2 - (A) Reservatório de polietileno. (B) Bomba d'água e reservatório secundário.

Figura 3 - Difusor tubular de ar dos alagados construídos.

Figura 4 – Vazão afluente e vazão efluente dos cinco sistemas alagados construídos.

Figura 5 – Evapotranspirações da cultura (ETc) dos alagados construídos.

Figura 6 – Remoção de DQO para os alagados construídos.

Figura 7 – Remoção de nitrogênio amoniacal para os alagados construídos.

Figura 8 – Remoção de nitrogênio total para os alagados construídos.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da solução concentrada e do efluente sintético.

Tabela 2 – Evapotranspiração média, máxima e mínima dos alagados construídos.

Tabela 3 – Valores médios das características físico-químicas do afluente e efluente dos alagados.

Tabela 4 – Demanda química do afluente e efluente dos alagados construídos e suas respectivas taxas de remoção.

Tabela 5 – Remoção de nitrogênio amoniacal afluente e efluente para os sistemas.

Tabela 6 – Remoção de nitrogênio total afluente e efluente para os sistemas.

Tabela 7 – Remoção de fósforo afluente e efluente para os sistemas.

Tabela 8 - ANOVA dos parâmetros DQO e NT obtidos nos cinco alagados construídos na segunda etapa do experimento.

Tabela 9 - Teste de Tukey dos parâmetros DQO e NT obtidos nos cinco alagados construídos na segunda etapa do experimento.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 7

2. OBJETIVOS 9

2.1. Objetivo principal 9

2.2. Objetivos secundários 9

3. MATERIAL E MÉTODOS 9

3.1. Características dos sistemas de tratamento 9

3.2. Origem do afluente e operação do sistema 10

3.3. Aeração intermitente 12

3.4. Coletas, análises e monitoramento do sistema 13

3.5. Balanço hídrico do sistema 13

3.6. Análise estatística 14

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 14

4.1. Avaliação do balanço hídrico 14

4.2. Desempenho geral dos alagados construídos 17

4.2.1. Remoção da demanda química de oxigênio 18

4.2.2. Remoção de nitrogênio amoniacal 20

4.2.3. Remoção de nitrogênio total 21

4.2.4. Remoção de fósforo total 23

4.3. Análise estatística 24

5. CONCLUSÃO 25

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 26

1. INTRODUÇÃO

O Saneamento Básico, segundo PNSB (Plano Nacional de Saneamento Básico) é o conjunto de ações que abrange o abastecimento de água, o esgotamento sanitário, o manejo de águas pluviais e o manejo de resíduos sólidos. No Brasil, existe uma grande desigualdade e déficit de acesso à população no saneamento em geral, entretanto o principal problema concentra-se no esgotamento sanitário, e essa lacuna impacta diretamente o meio ambiente, a qualidade de vida, a saúde pública e o trabalho de muitas pessoas, estagnando o desenvolvimento da comunidade (JÚNIOR; SAIANI, 2006; LEONETI; PRADO; OLIVEIRA, 2011).

De acordo com o SNIS (Sistema Nacional de Saneamento Básico) de 2015, somente 50,3% dos brasileiros possuem a rede coletora de esgoto e apenas 42,7% dos esgotos gerados tiveram tratamento adequado. Os índices, que não são satisfatórios, têm piores focos na zona rural do país. De acordo com a PNAD (Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios) (IBGE, 2015) menos de 25% da população rural do Brasil teve acesso ao esgotamento sanitário.

As principais dificuldades dos pequenos municípios para elaborar um plano de saneamento são a indisponibilidade de recursos financeiros e a limitação quanto à qualificação profissional e capacidade técnica municipal (LISBOA; HELLER; SILVEIRA, 2013). Outro fator que dificulta e encarece o processo, é a localização esparsa, que contribui para a conjuntura desfavorável ao saneamento. A zona rural lidera a falta de prioridades em políticas públicas. Diferentemente, os territórios urbanos, que concentram a maioria populacional, recebem atenção governamental. (EMBRAPA, 2018; JÚNIOR; SAIANI, 2006; KOBIYAMA; MOTA; CORCEUIL, 2008). Onde o saneamento não existe, a disposição excessiva de esgoto bruto no meio contamina solos, lençóis freáticos, corpos d'água, degradando completamente o ecossistema (BRUSCHI et al., 2002; JÚNIOR; SAIANI, 2006; PROSAB, 1999).

Apesar deste panorama, alguns processos, tais como as fossas sépticas, compostagens e sistemas alagados construídos são empregados como alternativas viáveis no tratamento de efluentes domésticos nas zonas rurais (KOBIYAMA; MOTA; CORCEUIL, 2008). Os alagados construídos (ACs), que são o foco da pesquisa em questão, segundo diversos estudos, mostram-se adequados a pequenas comunidades e localidades remotas pois são descentralizados, econômicos e capazes de contornar muitos dos problemas que impedem o saneamento rural de qualidade. Este método é vantajoso devida à sua base tecnológica simples, o uso de ferramentas não refinadas, a utilização recursos locais, baixo consumo energético (pelo uso renovável de energia como solar e cinética), um baixo custo de implementação, operação e manutenção, além

de não prover o uso intensivo da terra. Assim são considerados eco tecnológicos (LI et al., 2014; WU et al., 2014).

Os SACs (Sistemas Alagados Construídos) têm a função de reproduzir uma zona alagada natural, porém, com parâmetros controlados. Este controle é necessário visto que alagados naturais variam muito em seus componentes funcionais. Desta forma é possível usufruir dos processos que envolvem a vegetação, o solo, e o ambiente microbiano para um tratamento eficiente de água (VYMAZAL, 2008).

No Brasil, atualmente, o índice que avalia a qualidade das águas pós tratamento é o IQA (Índice de Qualidade das Águas), e seus alguns dos seus principais parâmetros são, OD (oxigênio dissolvido), DBO (demanda bioquímica de oxigênio), coliformes fecais, NT (nitrogênio total), FT (fósforo total), resíduo total além da temperatura d'água, pH turbidez (ANA, 2004). Alagados construídos com fluxo subsuperficial vertical e de fluxo horizontal, similarmente, apresentam um bom desempenho na remoção de DBO, DQO e SST (sólidos em suspensão totais). Assim como os coliformes fecais e totais, cuja redução é significativa também nestes sistemas (ABOU-ELELA, 2012; CALIJURI et al., 2009; NASCIMENTO, 2015). Entretanto, um dos parâmetros insatisfatórios é o desempenho na remoção de NT (VYMAZAL, 2007).

Pesquisas indicam que uma maneira eficiente de se remover o NT da água é o sistema NDS (Nitrificação e Desnitrificação Simultâneas). A efetividade do processo depende crucialmente do OD, pois os processos dominantes no sistema são definidos pela sua concentração na água (ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2016). Entretanto os SACs falham na demanda de oxigênio (HU et al., 2012), pois as bactérias nitrificantes o disputam com a biodegradação orgânica. Especialmente em alagados de fluxo subsuperficial, esta falha limita a nitrificação e consequentemente a remoção de NT (FAN et al., 2013).

Desta forma, a aeração artificial vem sendo investigada por diversos pesquisadores como uma solução (WU et al., 2014a), pois remove o NT de forma mais eficiente comparado aos alagados construídos tradicionais

Ressalta-se que para a realização da aeração é necessária cautela, pois a nitrificação é um processo aeróbio enquanto a desnitrificação é anaeróbia, e a altas concentrações de OD inibem a desnitrificação, e baixas concentrações de OD limitam a nitrificação (ZIELINSKA et al., 2012). Atentando-se a esta dinâmica, o uso da aeração intermitente artificial permite que a nitrificação e a desnitrificação ocorram no mesmo reator simultaneamente, pois fornecem condições aeróbicas e anaeróbicas alternadas, corrigindo também a demanda que limitava a nitrificação. (FAN et al., 2013; FOLADORI et al., 2013; NIVALA et al., 2007; WU et al., 2016; ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2016).

Atualmente, não é encontrada uma pesquisa exclusiva de aeração intermitente que compara taxas de oxigênio, com intuito de definir a quantidade que proporciona uma performance ideal em alagados construídos de fluxo horizontal subsuperficial.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal e os objetivos secundários da pesquisa constam a seguir.

2.1. Objetivo principal

O objetivo da presente pesquisa foi analisar o efeito de diferentes taxas de aplicação de oxigênio na remoção de DQO e NT em alagados construídos com aeração intermitente.

2.2. Objetivos secundários

Os objetivos secundários da pesquisa foram avaliar o balanço hídrico do sistema e caracterizar físico-quimicamente os SACs em relação aos seguintes parâmetros: séries nitrogenadas, fósforo total, pH, condutividade, temperatura e oxigênio dissolvido.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em ambiente protegido (estufa agrícola). O clima da região é definido como Cwa (Koppën): clima temperado quente (mesotérmico) com verão chuvoso e inverno seco, a temperatura média do mês mais quente supera 22 ºC. A precipitação e temperatura médias anuais são respectivamente, 1366,8 mm e 21,6ºC.

3.1. Características dos sistemas de tratamento

Cinco ACs de fluxo subsuperficial horizontal em escala piloto constituíram o sistema em questão. Cada AC era composto por uma caixa d'água retangular de polipropileno com capacidade aproximada de 61 litros. Como meio suporte utilizou-se brita #0, com porosidade média de 53%, determinada em laboratório com o uso de proveta graduada de um litro e água destilada. O meio suporte preencheu cada caixa até a altura de 30 cm e ficou saturado pelo efluente até 25 cm. Assim, conhecendo-se as dimensões das caixas d'água, a altura do nível do efluente e a porosidade do meio, calculou-se que cada AC apresentava volume útil aproximado de 26 litros.

A macrófita emergente utilizada nos sistemas foi a *Typha latifólia*, popularmente conhecida como Taboa, coletada em brejo natural e podada à meia altura, afim de manter a capacidade fotossintética da planta. O replantio nos alagados construídos foi realizado no dia 07/03/2018

com propágulos constituídos de plantas completas (rizoma + parte aérea). A densidade aproximada de plantio foi de 15 plantas por m^2, ou seja, cada alagado construído foi cultivado inicialmente com três plantas. Os alagados construídos após o plantio são mostrados na Figura 1. Após a fixação da espécie vegetal se iniciou a aplicação de água residuária no dia 02/04/2018.

Figura 1 – Alagados construídos utilizados

3.2. Origem do afluente e operação do sistema

O experimento foi conduzido utilizando água residuária sintética, que apresentava características físico-químicas semelhantes à efluente primário de tanque séptico, ou seja, este efluente não apresentava sólidos ou gorduras. A cada três semanas o efluente sintético era preparado em solução concentrada de 1,5 L e armazenado num refrigerador convencional. Esta solução era posteriormente diluída com água de abastecimento para aplicação nos cinco ACs. A composição do efluente primário sintético e da solução concentrada é representada na Tabela 1, conforme descrito nos trabalhos de Fan et al., 2016; Wu et al., 2015; Wu et al., 2016.

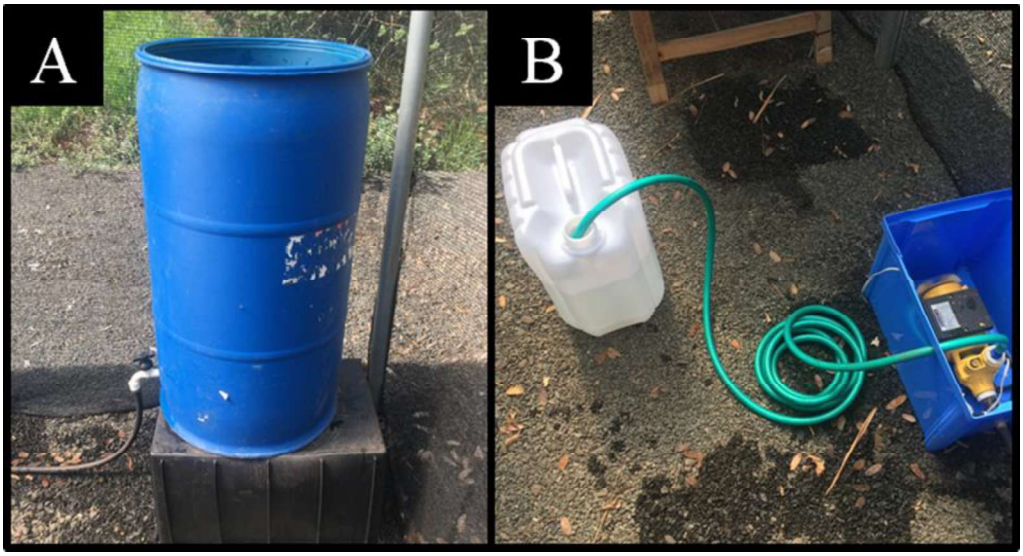
Tabela 1 - Composição da solução concentrada e do efluente sintético.

Componente	Concentração (g L^{-1})	
	Solução concentrada [a]	**Efluente sintético**
Sacarose [b]	-	0,3860
$(NH_4)_2SO_4$	112,80	0,1880
KH_2PO_4	10,80	0,0180
$MgSO_4.7H_2O$	12,30	0,0205
$FeSO_4.7H_2O$	10,98	0,0183
$CaCl_2.2H_2O$	7,96	0,0133

[a] Solução concentrada 600 vezes; [b] Sacarose era adicionada no preparo do efluente sintético;

O efluente sintético era preparado a cada dois dias seguindo as seguintes etapas: 1) a solução concentrada era retirada do refrigerados e misturada durante cinco minutos com auxílio de agitador magnético; 2) media-se em proveta 170 mL da solução concentrada; 3) em frasco de reagente (250 mL) era misturada a solução concentrada com 39,38 g de sacarose; 4) em um barril de polietileno com capacidade para 120 L (Figura 2A) a solução concentrada (com sacarose) era diluída em água de abastecimento público, resultando em 102 L de efluente síntético; e 5) o efluente sintético era transferido com auxílio de uma bomba d'água periférica (marca/modelo: IDB-35 ¼ Cv Ferrari) para cinco reservatórios secundários que abasteciam cada AC, cada reservatório recebia 18 L de efluente sintético, suficientes para 2 dias de operação do sistema (Figura 2B).

Figura 2 - (A) Reservatório de polietileno. (B) Bomba d'água e reservatório secundário.



Por meio de bombas peristálticas eram aplicados 8,7 L d^{-1} do efluente sintético em cada um dos cinco ACs. Assim, sabendo-se que o volume útil de cada SAC era de aproximadamente 26 litros, determinou-se que o tempo de detenção hidráulica nominal é de 3 dias. Transcorridos dois dias, todos os reservatórios secundários de entrada eram limpos e novamente reabastecidos.

3.3. Aeração intermitente

Os ACs eram aerados intermitentemente em 3 períodos com duração de 1 hora (1 h aerando/7 h sem aeração) distribuídos igualmente ao longo do dia. Assim, visando avaliar o efeito de diferentes taxas de aplicação de oxigênio na remoção de poluentes em alagados construídos, os sistemas eram operados com diferentes taxas de aplicação de oxigênio: AC 1: sem aeração 0 $L.min^{-1}$; AC 2: 2 $L.min^{-1}$; AC 3: 5 $L.min^{-1}$; AC 4: 10 $L.min^{-1}$; e AC 5: 20 $L.min^{-1}$. As diferentes vazões eram obtidas com o uso de compressores de ar para aquário disponíveis no mercado. O oxigênio era aplicado nos alagados construídos com um difusor tubular de ar (mangueira porosa para piscicultura) instalados no fundo e ao longo da seção longitudinal das caixas de polipropileno (Figura 3). Os compressores de ar de foram controlados (ligados e desligados) automaticamente utilizando temporizador de tomada digital.

Figura 3 - Difusor tubular de ar dos alagados construídos.

3.4. Coletas, análises e monitoramento do sistema

Foram realizadas cinco baterias de coleta de amostras nos dias 01/11, 09/11, 13/11, 23/11 e 07/12. Os parâmetros avaliados nas zonas de entrada e saída dos alagados construídos foram: DQO, pH, NT, nitrato, nitrito, fósforo total, condutividade elétrica, temperatura e vazão. As amostras foram coletadas, preservadas e analisadas físico-quimicamente de acordo com os métodos definidos pelo Standard Methods (APHA, 2012).

Além disso, a vazão efluente foi medida com o auxílio de reservatórios de 20 L padrão Inmetro (similar ao reservatório auxiliar) acoplados ao tubo de saída efluente de cada AC. A medição do volume de efluente coletado era feita com o advento de recipientes graduados e provetas.

3.5. Balanço hídrico do sistema

Do dia 18/09/18 ao dia 06/12/18 foi realizado o monitoramento do balanço hídrico dos ACs e, consequentemente, foi determinada a ETc (evapotranspiração da cultura). Para tal, foi utilizado o modelo de balanço hídrico de alagados construídos, sugerido por Kadlec e Wallace (2008), que pode ser descrito conforme a Equação 1.

$$\frac{dV}{dT} = Qi - Qo + Qc - Qb - Qgw - Qsm + (P.A) - (ETc.A) \quad (1)$$

onde, Q_i é a vazão afluente de água residuária ($L.dia^{-1}$); Q_o é a vazão efluente de água residuária (L.dia-^{1}); Q_c é taxa de escoamento de captação ($L.dia^{-1}$); Q_b é a taxa de infiltração do talude ($L\ dia^{-1}$); Q_{gw} é a infiltração para água subterrânea ($L.dia^{-1}$); Q_{sm} é a taxa de degelo ($L.dia^{-1}$); P é a precipitação ($mm.dia^{-1}$); ET_c é a evapotranspiração da cultura ($mm.dia^{-1}$); A é a área superficial (m^2); V é o volume de água armazenado (L); e t é o tempo (dias). Porém, devido às condições climáticas locais e às características dos alagados construídos, alguns parâmetros da equação podem ser desconsiderados, desta forma, resulta-se a Equação 2.

$$\frac{dV}{dT} = Qi - Qo - (ETc.A) \quad (2)$$

Uma vez que durante o período de monitoramento as perdas de massa por ETc foram menores do que os ganhos de massa e que devido ao controle do nível do efluente, o volume máximo de água armazenado nos sistemas foi de 26 L, considerou-se que não houve variação do volume de água armazenado nos alagados construídos e, portanto, a Equação 2 foi igualada a zero e rearranjada conforme mostrado na Equação 3.

$$Q_i = Q_o + (ETc\,.A) \qquad (3)$$

Em posse da vazão afluente de cada AC, da vazão efluente medida a cada dois dias e da área superficial dos alagados construídos, é possível calcular a ETc diária dos sistemas através da Equação 4. A Equação 4 foi obtida pelo remanejo da Equação 3, evidenciando o termo ETc.

$$ETc = \frac{(Qi - Qo)}{0{,}197025} \qquad (4)$$

em que ETc é a evapotranspiração da cultura (mm.dia^{-1}); Q_i é a vazão afluente (L.dia^{-1}); Q_o é a vazão efluente (L.dia^{-1}); e a constante apresentada é a área superficial dos alagados construídos.

3.6. Análise estatística

Os dados de DQO e NT obtidos nos ACFHs foram comparados por análise de variância (ANOVA) e a descriminação 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% ($P < 0{,}05$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após terem sido finalizadas as etapas do projeto, foram analisados todos os resultados e formulados os tópicos a serem discutidos. Sendo estes a avaliação do balanço hídrico, a análise físico-química, a análise estatística, a análise de evapotranspiração e a análise de eficiência dos sistemas. Com todas essas etapas cumpridas, foi possível determinar qual é a taxa de aeração que propicia uma melhor eficiência do tratamento nos sistemas alagados construídos.

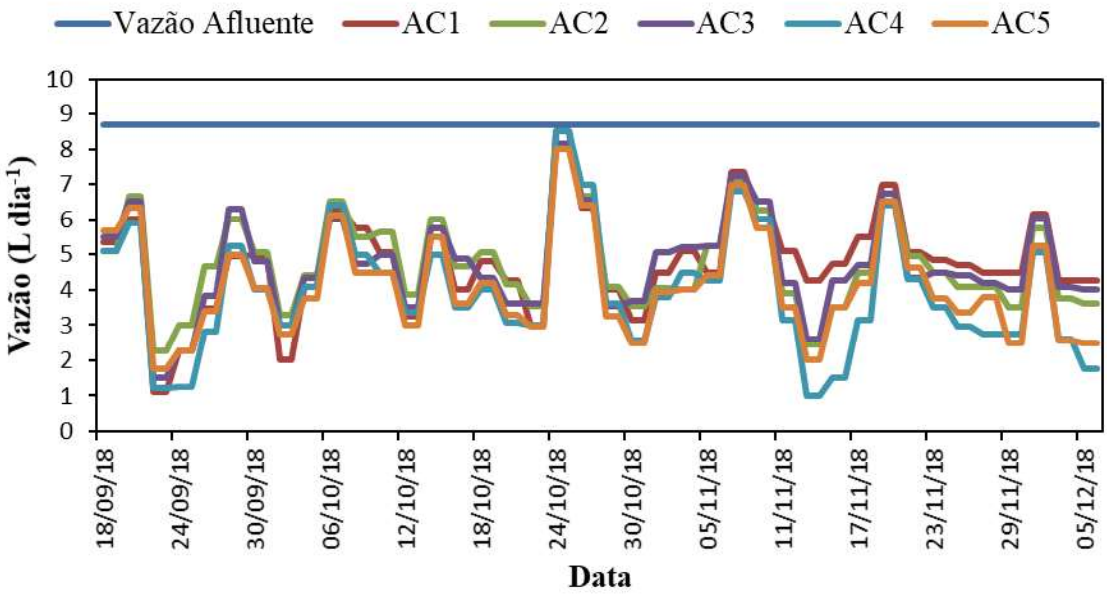
4.1. Avaliação do balanço hídrico

A fim de se caracterizar de maneira precisa as funções dos alagados construídos, é essencial que se compreenda o balanço hídrico dos sistemas, pois estes interagem de forma direta em seu desempenho. A interface do sistema alagado com a atmosfera propicia uma conexão com os fenômenos da precipitação e da evapotranspiração, dois dos principais componentes do ciclo hidrológico (KADLEC, 2006; USEPA, 1995). Por se tratar de um alagado construído num ambiente protegido, para fins do balanço hídrico, a precipitação é desconsiderada, mas a

evapotranspiração é de extrema relevância. A evapotranspiração é considerada a principal forma de perda hídrica em alagados construídos, alterando a concentração dos poluentes (LOTT; HUNT, 2001; PAPAEVANGELOU et al., 2012). Apesar de ser importante, os estudos sobre a ETc em alagados produziram resultados conflitantes e inconclusivos. Isso se deve à sua alta complexidade de fatores influenciadores, como o microclima, tipo de vegetação, condições ambientais diversas, e também a ampla gama de métodos utilizados para sua medição (PAPAEVANGELOU, 2012; CAMPBELL; WILLIAMSON, 1997; LAFLEUR, 1990; GOULDEN et al., 2007).

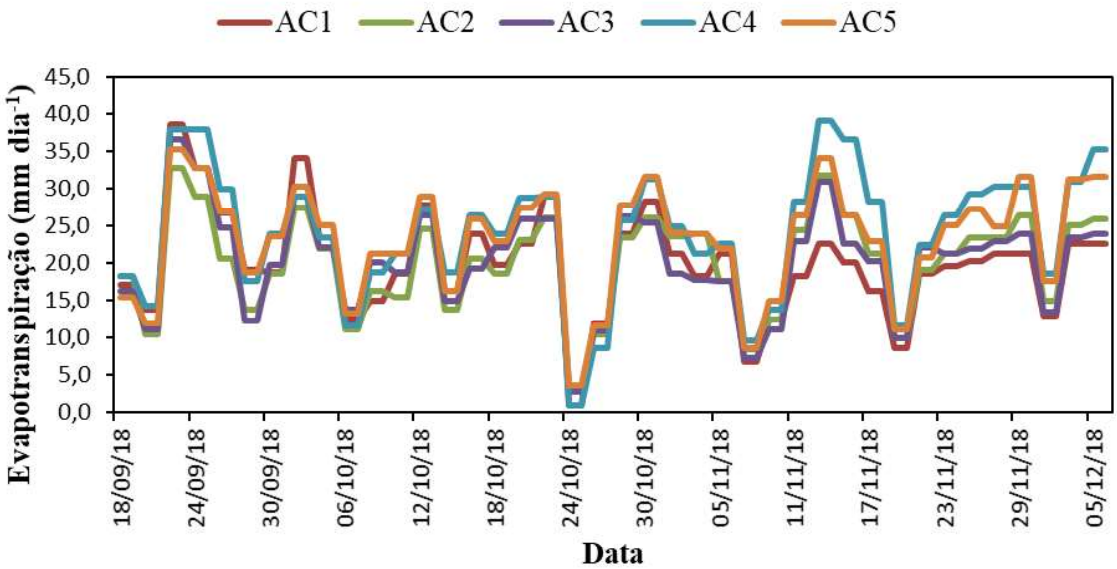
Embora exista esta ampla gama de métodos, não há unanimidade sobre a melhor metodologia a ser utilizada (MOHAMED et al., 2012). A etapa de medições para estimar a ETc dos sistemas com o método escolhido, ocorreu entre os dias 18 de setembro e 6 de dezembro. Foram coletados dados das vazões afluente e efluente, sendo representados na Figura 4.

Figura 4 – Vazão afluente e vazão efluente dos cinco sistemas alagados construídos.



A ETc decresce o volume de água do sistema e com isso o tempo de detenção hidráulica aumenta, diminuindo consequentemente a vazão efluente. Sabe-se que o volume de água evapotranspirado nos alagados construídos é a diferença entre as vazões de entrada e de saída dos alagados (vazão afluente e a vazão efluente). Assim, ao calcular o volume de água evapotranspirado e a área de cada alagado construído, foi calculada a lâmina de água evapotranspirada utilizando-se a Equação 4. Os resultados são apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Evapotranspirações da cultura (ETc) dos alagados construídos.



Os resultados de ETc, representados pela Figura 4, apresentam intensa variabilidade, sendo a média máxima e mínima, 36,4 e 2,3 mm.dia^{-1}, respectivamente. Os dados de cada alagado construído são representados pela Tabela 2.

Tabela 2 – Evapotranspiração média, máxima e mínima dos alagados construídos.

Sistema	Evapotranspiração (mm.dia^{-1})			
	Média	**Máxima**	**Mínima**	**Desvio padrão**
AC 1	19,97	38,58	1,02	7,18
AC 2	20,10	32,74	3,3	6,68
AC 3	20,21	36,55	2,79	6,96
AC 4	24,07	39,08	1,02	8,60
AC 5	23,11	35,28	3,55	4,45

Tais valores de evapotranspiração da cultura em questão estão de acordo com os trabalhos encontrados na literatura. Nota-se que variáveis como a espécie da macrófita emergente, localidade do sistema em relação à latitude, radiação solar, umidade do ar, temperatura e o clima local influenciam diretamente a evapotranspiração. Por exemplo, na Itália, obtiverem valores entre 1,3 e 37 mm.dia^{-1} de ETc em alagados construídos cultivados com *T. latifolia* (TUTTOLOMONDO et al., 2016) e no Brasil obtiveram valores médios de ETc entre 4,9 e 14 mm.dia^{-1} em alagados construídos cultivados com *Typha sp* (BRASIL; MATOS, 2008).

Os valores obtidos nas taxas de evapotranspiração do presente estudo podem ser decorrente de

alguns fatores. Essa evapotranspiração pode ser decorrente da eporação base (Eb) que ocorre devido ao calor latente do efluente em tratamento (BEEDE et al., 2014; KADLEC, 2006). Além disso, a superfície foliar exposta das macrófitas pode, eventualmente, estar associada à ocorrência de valores elevados de Etc, uma vez que quanto maior a altura e a área foliar das macrófitas maior será a interceptação de ventos secos e, consequentemente, maior será sua evapotranspiração (KADLEC; WALLACE, 2008).

Além disso, a representação gráfica dos resultados permite observar um padrão de repetição e similaridade entre os cinco alagados, com picos máximos e mínimos praticamente coincidentes. Dada tal informação, conclui-se que a aeração, aplicada de forma distinta em cada alagado (inclusive com a presença de um alagado sem aeração), não influencia na taxa de evaporação de cada sistema.

4.2. Desempenho geral dos alagados construídos

Na Tabela 3 são mostradas as características físico-químicas do afluente e dos efluentes dos cinco sistemas estudados à respeito de todos os parâmetros analisados na pesquisa. Os valores foram obtidos realizando a média dos parâmetros nas 5 baterias de análise.

Tabela 3 – Valores médios das características físico-químicas do afluente e efluente dos alagados

Parâmetros	Afluente	Sistemas Alagados Construídos				
		AC1	AC2	AC3	AC4	AC5
DQO ($mg.L^{-1}$)	388,8	23,8	9,6	8,2	9,4	6,8
NT ($mg.L^{-1}$)	40,5	20,8	8	7,9	7,6	6,6
NH_4 ($mg.L^{-1}$)	39,2	16,5	0,8	0,6	0,5	0,6
NO_3 ($mg.L^{-1}$)	1,4	4,3	7	7,2	7	6
NO_2 ($mg.L^{-1}$)	0	0,02	0,09	0,1	0,05	0,05
P ($mg.L^{-1}$)	12,9	1,6	0,9	0,9	1,2	0,9
pH	7	7,1	6,7	6,5	6,6	6,7
CE ($\mu S.cm^{-1}$)	563,5	379	439	474	441	578,5
T (ºC)	23,1	21,5	20,8	20,1	20,2	20,3
OD ($mg.L^{-1}$)	-	0,5	1,4	2,0	2,4	3,0

4.2.1. Remoção da demanda química de oxigênio

A seguir, na Figura 6 e na Tabela 4, são mostrados o comportamento e as remoções de DQO para os cinco alagados construídos durante a execução do experimento, respectivamente.

Figura 6 – Remoção de DQO para os alagados construídos

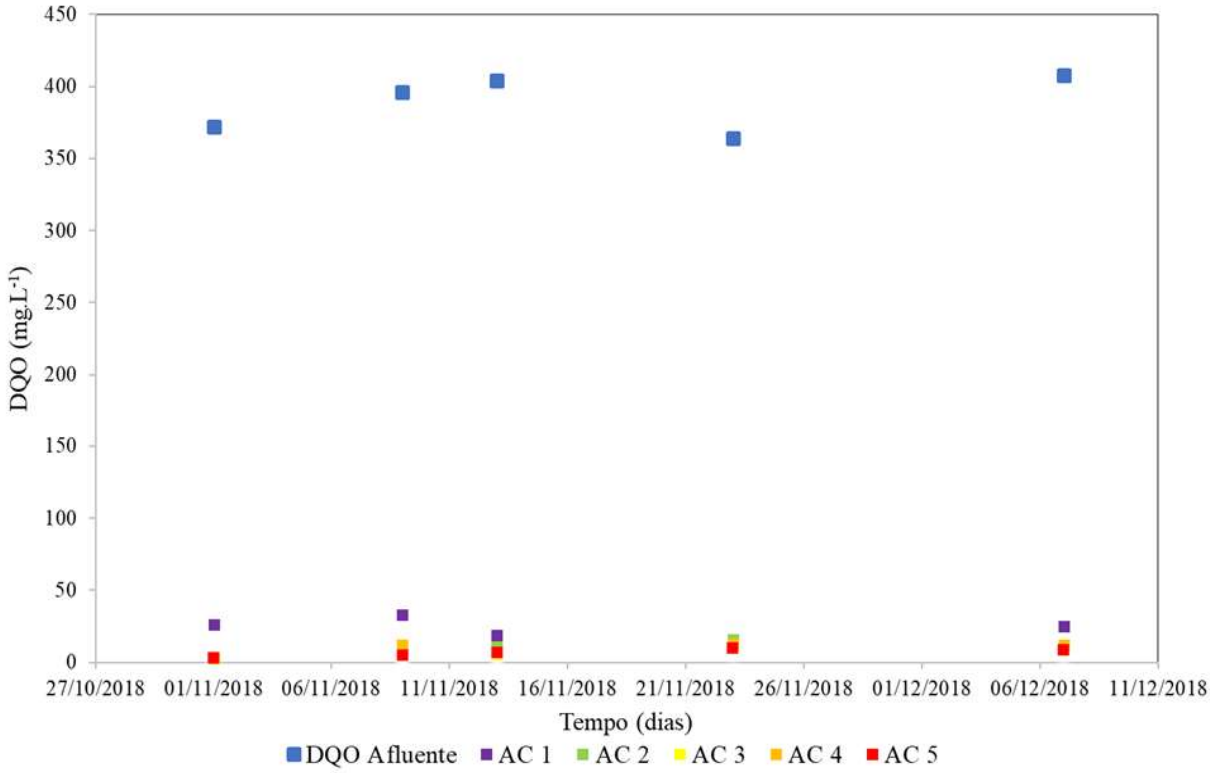


Tabela 4 – Demanda química do afluente e efluente dos alagados construídos e suas respectivas taxas de remoção.

	DQO ($mg.L^{-1}$)	Valor máximo ($mg.L^{-1}$)	Valor mínimo ($mg.L^{-1}$)	(%)
Afluente	388,8 ± 19,7	4081	3643	
AC 1	23,8 ± 6,6	33	16	93,9
AC 2	9,6 ± 5,1	16	3	97,5
AC 3	8,2 ± 3,7	12	3	97,9
AC 4	9,4 ± 4,3	13	3	97,6
AC 5	6,8 ± 2,9	10	3	98,3

A análise dos resultados mostra uma sutil melhora de remoção de DQO nos sistemas aerados, sendo aproximadamente 4% maior quando comparada à eficiência geral de um sistema não aerado. No sistema sem aeração (AC1) a eficiência média gira em torno de 93,9%, com 23,8 $mg.L^{-1}$ de DQO remanescente, enquanto nos sistemas de aeração intermitente essa porcentagem média de eficiência vale de 97,5 (AC2) a 98,3% (AC5) e suas respectivas DQOs remanescentes equivalem a 9,6 e 6,8 $mg.L^{-1}$.

Essa melhora se deve aos mecanismos de remoção inerentes aos sistemas com os ambientes aeróbios e anaeróbios alternados, onde respectivamente as bactérias aeróbias e anaeróbias degradam a matéria orgânica. Nos sistemas aerados, predomina a remoção de material orgânico carbonáceo através da respiração aeróbia, enquanto em condições anaeróbias e anóxicas os mecanismos são diversos e incluem a fermentação e a desnitrificação (QUELUZ, 2016).

Os resultados encontrados neste trabalho assemelham-se aos de outras publicações com renome. Wu et al (2016a) atingiu a média de eficiência de remoção em DQO acima de 95% em alagados construídos de fluxo subsuperficial com aeração intermitentemente para tratamento de esgoto doméstico. Em Fan (2013) 97% de remoção de DQO em alagados construídos com aeração intermitente de fluxo subsuperficial foram obtidas.

Existem, na literatura, trabalhos onde a eficiência mostra-se inferior quando comparada ao presente trabalho, como em Yusoff et al (2018), que obteve redução de 109,9 para 38,9 $mg.L^{-1}$ de DQO, representando 66,1% de remoção em alagados construídos de fluxo subsuperficial, cultivado com *S. Grossus*, para efluentes de fábrica de celulose e reciclagem de papel. Assim como o percentual de remoção de 69,9% e 64,8% com *P. Australis* e *C. Papyrus*, com águas residuárias com tratamento primário em alagados construídos em escala piloto de fluxo subsuperficial vertical, na pesquisa de García-Ávila et al (2019). Essa distinção, possivelmente, se da em decorrência da diferente origem dos efluentes.

Tendo em base os resultados obtidos neste trabalho e apresentados na Tabela 3, apesar de todos os sistemas aerados não apresentarem uma diferença substancial em relação à eficiência de remoção, o alagado construído 5 apresentou uma melhor performance. Sua taxa de aplicação de oxigênio injetava 20 $L.min^{-1}$, sendo a maior taxa do experimento. Sua DQO média equivale a 6,8 $mg.L^{-1}$, e possui a menor variância dentre todos os sistemas, ou seja, durante a bateria de análises, foi o sistema que apresentou a menor discrepância e oscilação em seus valores, mantendo uma constante e ótima eficiência de remoção.

4.2.2. Remoção de nitrogênio amoniacal

Na Figura 7 e na Tabela 5, são mostrados o comportamento e as remoções de NH_4 para os cinco alagados construídos, de acordo com as análises realizadas, respectivamente.

Figura 7 – Remoção de nitrogênio amoniacal para os alagados construídos

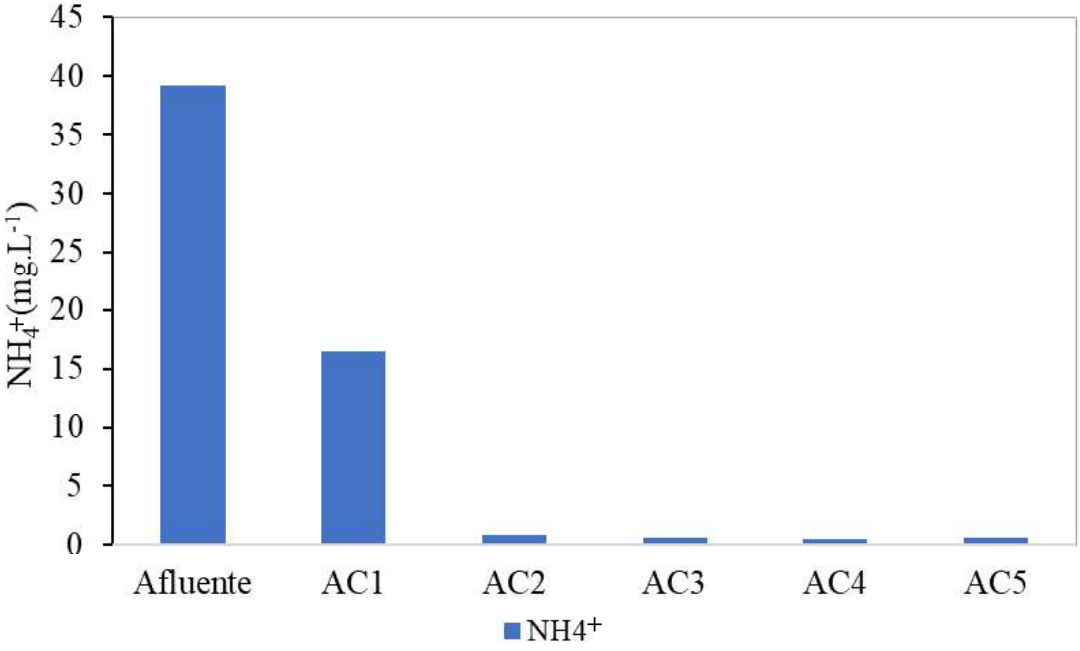


Tabela 5 – Remoção de nitrogênio amoniacal afluente e efluente para os sistemas

	NH_4^+ ($mg.L^{-1}$)	Valor máximo ($mg.L^{-1}$)	Valor mínimo ($mg.L^{-1}$)	(%)
Afluente	39,2 ± 2,3	42,91	36,73	
AC 1	16,5 ± 1,0	17,6	15,3	57,7
AC 2	0,8 ± 0,8	2,2	0,3	97,8
AC 3	0,6 ± 0,6	1,7	0,3	98,4
AC4	0,5 ± 0,5	1,5	0,3	98,6
AC 5	0,6 ± 0,3	0,9	0,3	98,5

Os resultados obtidos na análise mostram uma melhora acentuada na remoção de NH_4^+ nos sistemas aerados, elevando a eficiência em aproximadamente 40% quando comparada à eficiência geral de um sistema não aerado. No sistema sem aeração (AC1), a eficiência média gira em torno de 57,7%, com 16,5 $mg.L^{-1}$ de NH_4^+ remanescente, enquanto nos sistemas de

aeração intermitente essa porcentagem média de eficiência vale de 97,8% (AC2) a 98,6% (AC4) e suas respectivas NH_4^+ remanescentes equivalem a 0,8 e 0,5 $mg.L^{-1}$. Observa-se um comportamento estável quanto à remoção de nitrogênio amoniacal ao comparar somente os alagados com diferentes taxas de aeração entre si. Assim, é possível inferir que até a menor taxa de aeração é suficiente para a obtenção de um bom resultado na remoção de NH_4^+ nos sistemas. A melhora na eficiência do sistema controle (AC1) quando comparado aos demais, se deve à disponibilidade de oxigênio, proporcionada pelo advento da aeração artificial. Em ambientes aeróbios, os sistemas realizam o processo de nitrificação, com as bactérias aeróbias, convertendo a amônia em nitrito e nitrato.

Existem na literatura, trabalhos com resultados similares aos obtidos pela presente pesquisa. Alguns destes mostram, em alagados construídos de fluxo vertical com aeração intermitente, remoção de amônia à 98,4% (WU et al., 2016), 96,1% na eficiência de remoção por Fan et al (2016), assim como em 97,4% e 98,8% de eficiencia em alagados construidos por Wu et al (2016a).

4.2.3. Remoção de nitrogênio total

Foi investigada a remoção de nitrogênio total durante a execução do trabalho, e os resultados obtidos são complementados pela Figura 8 e pela Tabela 6.

Figura 8 – Remoção de nitrogênio total para os alagados construídos

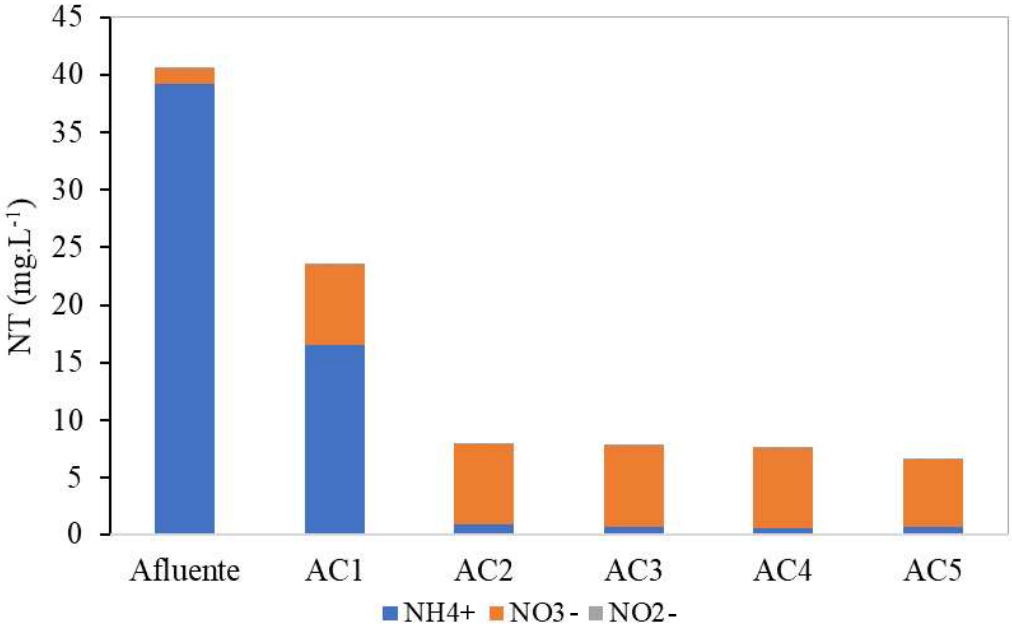


Tabela 6 – Remoção de nitrogênio total afluente e efluente para os sistemas

	NT ($mg.L^{-1}$)	Valor máximo ($mg.L^{-1}$)	Valor mínimo ($mg.L^{-1}$)	(%)
Afluente	40,5 ± 2,3	44,5	38,4	
AC 1	20,8 ± 2,0	23,2	17,6	48,6
AC 2	8,0 ± 2,6	11,9	4,5	80
AC 3	7,9 ± 1,5	9,1	6,0	80,5
AC4	7,6 ± 1,5	9,2	5,5	81
AC 5	6,6 ± 1,2	8,4	5,3	83,6

Segundo os dados obtidos e mostrados na tabela acima, nota-se um aumento de aproximadamente 30% na eficiência de remoção média de NT dos sistemas aerados intermitentemente. No sistema sem aeração (AC1), a eficiência média gira em torno de 48,67%, com 20,8 $mg.L^{-1}$ de NT remanescente, enquanto nos sistemas de aeração intermitente essa porcentagem média de eficiência vale de 80% (AC2) a 83,6% (AC5) e seu respectivos NT remanescentes equivalem a 8,0 e 6,6 $mg.L^{-1}$. Os dados produzidos concordam com a bibliografia existente em demais trabalhos, como o 85,8% de eficiência por Fan et al (2016) e 90,6% por Wu et al (2016), ambos em alagados construídos com aeração intermitente.

A Figura 8 mostra a composição de NH_4^+, NO_3^- e NO_2^- do afluente e do efluente dos cinco alagados construídos. As concentrações médias de NO_2^- registradas durante a execução do experimento foram muito pequenas (<0,3 $mg.L^{-1}$), indicando que a transformação de NO_2^- para NO_3^- ocorre rapidamente. O efluente do AC 1 era composto principalmente por NH_4^+ devido à nitrificação limitada. Já os efluentes dos sistemas aerados (AC 2-5) eram 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 biodegradável. Wu et al (2016a) também relataram que a deficiência de carbono impediu a completa desnitrificação do efluente em AC de fluxo vertical aerados intermitentemente.

Em relação ao nitrogênio total, o mecanismo responsável pela melhora de aproximadamente 30% na eficiência de tratamento, é a atuação da nitrificação e desnitrificação simultâneas, proporcionada pela aeração intermitente nos sistemas. No alagado onde o tratamento foi realizado em ambiente anaeróbio, a porcentagem média de remoção foi de 48,6% enquanto nos

sistemas aerados atingiu entre 80% e 83,6%. Este sistema age nestas duas interfaces, onde o nitrogênio amoniacal se converte em nitrito e nitrato nos ambientes aeróbios, em seguida, em ambientes anaeróbios o nitrato se converte em nitrogênio gasoso (ZOPPAS; BERNARDES; MENEGUZZI, 2016). Ademais, é necessário que se mencione o papel da absorção pela macrófita para a remoção do NT, pois os sistemas aerados são abuntantes em nitrato. Segundo Vymazal (2007), em ambientes ricos neste ânion, este torna-se a fonte mais importante de nitrogênio nutriente para o crescimento da planta, através de suas raízes ou até mesmo brotos de plantas submersos, contribuindo para a eficiência de sua remoção na água.

É importante ressaltar também que, após a estabilização do sistema alagado, um acúmulo de nitrato nos sistemas com aeração intermitente é notório na análise final de eficiência. Este se deve, possivelmente, pela falta de carbono orgânico no meio e à diminuição da desnitrificação pela predominância do ambiente aerado e (MALTAIS-LANDRY et al., 2009). Podemos constatar a falta de carbono orgânico no meio com o auxílio da Tabela 4 e da Figura 6, onde os dados de DQO dos alagados são citados, estando abaixo de 10 mg L^{-1} nos sistemas aerados.

4.2.4. Remoção de fósforo total

A partir dos estudos realizados, foi possível obter a Tabela 7 que mostra os resultados da remoção de fósforo total nos sistemas alagados construídos.

Tabela 7 – Remoção de fósforo total afluente e efluente para os sistemas

	PT ($mg.L^{-1}$)	Valor máximo ($mg.L^{-1}$)	Valor mínimo ($mg.L^{-1}$)	(%)
Afluente	3,9 ± 0,5	4,4	3,4	
AC 1	1,6 ± 0,7	2,3	0,8	58,7
AC 2	0,9 ± 0,6	1,4	0,1	79,2
AC 3	0,9 ± 0,5	1,3	0,1	77,6
AC 4	1,2 ± 0,7	1,9	0,1	70,2
AC 5	0,9 ± 0,7	1,8	0,1	78,1

Em relação à eficiência de remoção de fósforo nos sistemas, é possível notar uma melhora de aproximadamente 17% ao comparar as médias dos alagados aerados com os não aerados. Sendo assim, no sistema sem aeração (AC1) a eficiência é a menor de todos os sistemas estudados atingindo 58,7% e contendo 1,6 $mg.L^{-1}$ de fósforo remanescente. Já nos sistemas de aeração intermitente, essa porcentagem média de eficiência é maior, e abrange um intervalo de 70,2%

(AC4) a 79,2% (AC2) e suas respectivas concentrações remanescentes equivalem a 1,2 e 0,9 $mg.L^{-1}$.

Os principais mecanismos de remoção de fósforo, geralmente, são a adsorção pelo o meio suporte, em rochas ricas em ferro e alumínio (JÚNIOR, 2003; MENDONÇA et al., 2012; VYMAZAL, 2007) e a absorção de nutrientes pela macrófita, que os utilizam prontamente para seu desenvolvimento (CHEN et al., 2014), aumentando a eficiência de remoção dos sistemas (VYMAZAL; KROPFELOVÁ, 2008).

Os resultados da presente pesquisa estão de acordo com demais bibliografias de renome, como em Gárcia-Ávila (2019) que obtiveram uma melhora de 50% em fósforo total e em Vymazal (2007) tem, para o mesmo parâmetro, intervalo de 40 a 60% de eficiência.

4.3. Análise estatística

A Tabela 8 a seguir mostra a análise de variância (ANOVA) para os parâmetros de DQO e NT dos experimentos.

Tabela 8 – ANOVA dos parâmetros DQO e NT obtidos nos cinco ACs na segunda etapa do experimento

Parâmetro	ANOVA					
	Fonte	**SQ**	**GL**	**QM**	**F-Teste**	**P-Valor**
DQO	Entre grupos	961,36	4	240,34	10,90	**<0,0001**
	Dentro de grupos	440,8	20	22,04		
	Total (Corr.)	1402,16	24			
NT	Entre grupos	706,75	4	176,688	51,98	**<0,0000**
	Dentro de grupos	67,988	20	3,4		
	Total (Corr.)	774,739	24			

GL: Grau de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio

Através do ANOVA, a variância foi decomposta em intergrupos (entre os alagados construídos) e intragupos (para cada alagado construído), para os parâmetros de DQO e NT, afim de originar o índice F. O índice F, equivale a 10,90 para DQO e 51,98 para NT. Ele é calculado pela razão entre a estimativa intergrupos e intragrupos. Como o valor de P é menor que 0,05 para ambos os casos, sabe-se que existe uma diferença estatística significativa entre as médias de DQO e NT de um alagado construído para outro no nível de significância de 5%. Entretanto, para que sejam determinadas quais médias são significativamente diferentes das outras, foi realizado o Teste de Tukey (Tabela 9).

Tabela 9 - Teste de Tukey dos parâmetros DQO e NT obtidos nos cinco alagados construídos na segunda etapa do experimento.

Parâmetro	Teste de Tukey			
	Sistema	**Contagem**	**Média**	**Homogeneidade***
DQO	1	5	23,8	a
	2	5	9,6	b
	3	5	8,2	b
	4	5	9,4	b
	5	5	6,8	b
NT	1	5	20,76	a
	2	5	7,97	b
	3	5	7,88	b
	4	5	7,63	b
	5	5	6,61	b

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

Os resultados obtidos no Teste de Tukey 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.

5. CONCLUSÃO

Os resultados do presente trabalho indicam que alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal são sistemas dinâmicos e seu tempo de detenção hidráulica é diretamente influenciado pela evapotranspiração. Além disso, foi observada a semelhança nesta dinâmica ao longo do tempo nos cinco alagados piloto sob tal condição.

Assim, é clara a importância da evapotranspiração no balanço hídrico, pois esta reduz expressivamente a vazão de saída de efluente dos sistemas, o que consequentemente causa aumento da concentração final de poluentes após o tratamento e a subestimação da eficácia de tratamento. Estes fatores direcionam que a perdas de água por evapotranspiração deve ser um fator preponderante no dimensionamento e análise de eficiencia de alagados construídos. Ressalta-se, que a faixa de variação da ETc em alagados construídos é ampla nos trópicos, com valores máximos superiores aos observados em culturas agrícolas convencionais. Além disso, a aeração do sistema não interfere na ETc, uma vez que todos os sistemas avaliados apresentam curvas de comportamento similares.

Com respeito aos parâmetros físico-químicos, conclui-se que tanto na DQO quanto no NT, os sistemas aerados intermitentemente mostraram um melhor desempenho quando comparados ao alagado não aerado. As porcentagens obtidas para DQO e NT em alagados não aerados foram de 93,9% e 48,6%, enquanto em alagados com aeração chegaram em até e 98,3% e 83,6%, com melhorias de 30% e 3% aproximadamente. Assim é comprovada importância do sistema de aeração no tratamento realizado por alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal.

Finalmente, conclui-se que a falta de aeração nos sitemas alagados minimiza seu potencial para a remoção de NT e DQO, entretanto, todas as taxas propostas de aeração melhoram seu desempenho, sem existir uma a se ressaltar como melhor.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOU-ELELA, S.; GOLINELLI, G; EL-TABL, A.; HELLAL, M. **Treatment of municipal wastewater using horizontal flow constructed wetlands in Egypt.** Water Science and Technology, v. 69, n. 1, p.38-47, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). **Índice de qualidade das águas.** 2004. Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx> acesso em: 22 de janeiro de 2018.

APHA – American Public Health Association. **Standard methods for the examination for water and wastewater**. 22. ed. Washington, Dc: APHA-AWWA-WEF, 1496 p., 2012.

BEEDE, D. A., CASTLE, J. W., MOLZ, F. J., RODGERS JR., J. H. **Effects of evapotranspiration on treatment performance in constructed wetlands: Experimental studies and modeling.** Ecological Engineering., 71, 394–400, 2014.

BRASIL, M. S.; MATOS, A. T. **Avaliação de aspectos hidraúlicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial**. Eng. sanit. ambient., v. 13, n. 3, p. 323-328, 2008

BRUSCHI D.M.; RIBEIRO M.A.; PEIXOTO M.C.D.; SANTOS R.C.S.; FRANCO R.M. **Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios: Município e Meio Ambiente**. Vol. 1, 3ª ed. Belo Horizonte – MG: Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM: Gráfica e Editora Sigma Ltda., 114 p. p.68, 2002.

CAMPBELL, D.I.; WILLIAMSON, J.L. **Evaporation from a raised peat bog**. J. Hydrol., 193, 142–160, 1997

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.** Vol. 14, n.3, 2009.

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, v. 63, p.158–167, 2014.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Saneamento Rural.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-saneamento-basico-rural> acesso em 21 de janeiro de 2018.

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, Vol.141, 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, Vol. 214, p. 871-875, 2016.

FOLADORI, P.; RUABEN, J.; ORTIGARA, A. R. **Recirculation or artificial aeration in vertical flow constructed wetlands: a comparative study for treating high load wastewater**. Bioresource Technology, v. 149, p.398–405, 2013.

GARCÍA-ÁVILA F., PATIÑO-CHÁVEZ J., ZHINÍN-CHIMBO F., DONOSO-MOSCOSO S., FLORES DEL PINO L. & AVILÉS-AÑAZCO A., **Performance of Phragmites Australis and Cyperus Papyrus in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands**. International Soil and Water Conservation Research, doi: https://doi.org/10.1016/j.iswcr. 2019.

GOULDEN, M. L.; LITVAK, M.; MILLER, S. D. **Factors that control Typha marsh evapotranspiration.** Aquat. Bot., v. 86, p. 97–106, 2007.

HU, Y.; ZHAO, Y.; ZHAO, X.; KUMAR, J. G. **High Rate Nitrogen Removal in an Alum SludgeBased Intermittent Aeration Constructed Wetland.** Environmental Science & Technology, v. 46, n. 8, p.4583-4590, 2012.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios**. Plataforma Sidra: Banco de Tabelas Estatísticas. Disponível em: < sidra.ibge.gov.br/pesquisa/Pnad/geral/pesquisa-basca> acesso março de 2021.

JÚNIOR, A. S. M. **Dinâmica da remoção de nutrientes em alagados construídos com typha sp.** 2003. 295 f. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia AgrÍcola, Faculdade de Engenharia AgrÍcola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

JÚNIOR, R.T.; SAIANI, C.C.S. **Restrições à expansão dos Investimentos no Saneamento Básico Brasileiro**. Fortaleza: Revista econômica do Nordeste, Vol. 37, nº4, 2006.

KADLEC, R.H. **Water temperature and evapotranspiration in surface flow wetlands in hot arid climate.** Ecol. Eng. 26, 328–340, 2006.

KADLEC, R. H., AND WALLACE, S. D. **Treatment Wetlands**, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, 1016 p., 2008

KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; CORCEUIL, C.W. **Saneamento rural**. In: Seminário Saneamento Ambiental. Rio Negrinho: ACIRNE, Anais, 24 p. 2008.

LAFLEUR,P. **Evaporation from wetlands**. Can.Geogr. 34,79–88p. 1990.

LEONETI, A. B.; PRADO, E. L. do; OLIVEIRA, S. V. W. B. de. **Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI**. Rev. Adm. Pública. Rio de Janeiro, v. 45, n. 2, p. 331-348, 2011.

LI, F.; LU, L.; ZHENG, X.; ZHANG, X. **Three-stage horizontal subsurface flow constructed wetlands for organics and nitrogen removal: Effect of aeration.** Ecological Engineering, v. 68, p.90-96, 2014.

LISBOA, S.S.; HELLER, L.; SILVEIRA, R. B. **Desafios do planejamento municipal de saneamento básico em municípios de pequeno porte: a percepção dos gestores.** Engenharia Sanitária Ambiental. Vol.18 n.4, pp. 341-348, 2013.

LOTT, R. B.; HUNT, R. J. **Estimating evapotranspiration in natural and constructed wetlands. Wetlands**, [s.l.], v. 21, n. 4, p.614-628, dez. 2001. Springer Nature. http://dx.doi.org/10.1672/0277-5212, 2001.

MALTAIS-LANDRY, G., MARANGER, R., BRISSON, J., & CHAZARENC, F. (2009). **Nitrogen transformations and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands.** Water Research, 43(2), 535–545, 2008. Disponível em: <. doi:10.1016/j.watres >

YUSOFF, M. F., ABDULLAH, S. R. S., & HASAN, H. A. **Performance of continuous pilot subsurface constructed wetland using Scirpus grossus for removal of COD, colour and suspended solid in recycled pulp and paper effluent.** Environmental Technology & Innovation, 2019. Disponível em: < doi:10.1016/j.eti.2018.12.008>

MENDONÇA, H. V.; RIBEIRO, C. B. M.; BORGES, A. C.; BASTOS, R. R. **Remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuárias de laticínios por sistemas alagados construídos operando em bateladas.** Ambi-Agua, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 75-87, 2012.

MOHAMED, Y. A.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; SAVENIJE, H. H. G.; VAN DEN HURK, B. J. J. M.; FINLAYSON, C. M. **Wetland versus open water evaporation: an analysis and literature review.** Phys. Chem. Earth, v. 47–48, p. 114–121, 2012

NASCIMENTO, T. L. **Estudo do uso de Wetlands Construídas no tratamento de esgotos domésticos em comunidades rurais**. 70f. Monografia (Graduação) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015

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 Total Environment, 380:19-27, 2007.

PAPAEVANGELOU, V. A., GEORGIOS D. G., TSIHRINTZIS, V. A. **Evaluation of evapotranspiration in small on-site HSF constructed wetlands**. Páginas 766-785. 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1080/10934529.2012.660111

Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB): Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada do solo. CAMPOS, J. R. (Coord.). Rio de Janeiro: ABES, 1999. 464 p.: il. Projeto PROSAB.

QUELUZ, J. G. T. **Eficiência de alagados construídos para o tratamento de águas residuárias com baixas cargas orgânicas.** 2016. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia (Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2016.

Sistema nacional de informações sobre saneamento – SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2015. 212 p. p. 26

TUTTOLOMONDO, T.; LETO, C.; LA BELLA, S.; LEONE, R.; VIRGA, G.; LICATA, M. **Water balance and pollutant removal efficiency when considering evapotranspiration in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland in Western Sicily (Italy).** Ecological Engineering, v. 87, p.295-304, 2016.

USEPA (1995). **Handbook of Constructed Wetlands. A Guide to Creating Wetlands for: Agricultural Wastewater, Domestic Wastewater, Coal Mine Drainage, Stormwater in the Mid-Atlantic Region**, Volume 1. USEPA Region III with USDA, 53 pp. (publication number 903B95004).

VYMAZAL, J., 2007. **Removal of nutrients in various types of constructed wetlands**. Science of the Total Environment. Vol. 380, pp. 48-65. 2007.

VYMAZAL, J. **Constructed Wetlands, surface flow**. Elsevier. p. 765, 2008

VYMAZAL, J., KROPFELOVÁ, L., **Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow.** Springer, Dordrecht. 2008.

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 & Biodegradation, 113, p. 139–145, 2016. Disponível em: <.doi:10.1016/j.ibiod. >

WU, H., FAN, J., ZHANG, J., NGO, H. H., GUO, W., LIANG, S., LU, S.; WU, S. (2016). **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, 2016a. Disponível em: <.doi:10.1016/j.biortech>

WU, H. & ZHANG, J. & HAO NGO, H. & GUO, W. & HU, Z. & LIANG, S. & FAN, J. & LIU, H. **A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation**. Bioresource technology 175C. p. 594-601, 2014.

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, Elsevier BV. v. 57, p.40-55, 2014a.

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, v. 176, p.163–168, 2015.

ZIELINSKA, M.; BERNAT, K.; CYDZIK-KWIATKOWSKA, A.; SOBOLEWSKA, J.; WOJNOWSKA-BARYLA, I. **Nitrogen removal from wastewater and bacterial diversity in activated sludge at different COD/N ratios and dissolved oxygen concentrations.** China: Journal of Environmental Sciences v. 24, n. 6, p. 990-998, 2012.

ZOPPAS, F.M.; BERNARDES, A.M.; MENEGUZZI, A. **Parâmetros operacionais na remoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea.** Engenharia Sanitária Ambiental, Vol.21 n.1 p. 29-42, 2016.