

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Wagner Alex dos Santos

**IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS
VERTICAIS PARA O TRATAMENTO DE LODO DE TANQUE
SÉPTICO**

Frederico Westphalen, RS

2021

Wagner Alex dos Santos

**IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS VERTICAIS
PARA O TRATAMENTO DE LODO DE TANQUE SÉPTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária, da Universidade
Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Orientadora: Prof.^a Dra. Samara Terezinha Decezaro

Frederico Westphalen, RS, Brasil

2021

Wagner Alex dos Santos

**IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS VERTICAIS
PARA O TRATAMENTO DE LODO DE TANQUE SÉPTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Ambiental e Sanitarista**.

Aprovado em: 17/08/2021

Samara Terezinha Decezaro, Dra. (UFSM)

(Presidente/Orientadora)

Marcus Bruno Soares, Dr. (UFSM)

Raphael Corrêa Medeiros, Dr. (UFSM)

Frederico Westphalen, RS

2021

AGRADECIMENTOS

Este foi um trabalho bastante extenso, que precisou de muita capacidade intelectual e, além disso, precisou de muita mão de obra. Por isso, gostaria de agradecer a todos que colaboraram para que ele pudesse ter sido feito.

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as bênçãos e por me manter saudável para trabalhar.

Agradeço também a toda ajuda dada pela minha família e pelos meus amigos – em especial aos colegas que ajudaram diretamente no trabalho.

Aos professores, Dr. Marcus Bruno Soares e Dr. Raphael Corrêa Medeiros, por aceitarem o convite para compor minha banca e contribuir com este trabalho.

A minha orientadora Prof.^a. Dra. Samara Terezinha Decesaro, que me acompanhou em todas as etapas desta pesquisa.

E por fim, agradeço a toda Instituição UFSM, desde os funcionários, até os professores, por se fazerem presentes durante essa etapa da minha vida.

EPÍGRAFE

***“As palavras só têm sentido
se nos ajudam a ver o mundo
melhor”***

Rubem Alves

RESUMO

IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS VERTICAIS PARA O TRATAMENTO DE LODO DE TANQUE SÉPTICO

AUTOR: Wagner Alex dos Santos

ORIENTADORA: Samara Terezinha Decezaro

Os tanques sépticos são unidades de tratamento para o esgoto doméstico bastante utilizadas no país. São projetados para reter e tratar o esgoto durante determinado período de tempo. Porém, esse tratamento gera um subproduto – o lodo – que precisa ser retirado periodicamente do tanque e encaminhado para um tratamento, pois contém matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos – prejudiciais ao meio ambiente. Desse modo, procurou-se avaliar o desempenho de *wetlands* construídos verticais (WCV) para o tratamento de lodo proveniente de tanque séptico. Foram implantados 6 WCV atuando em diferentes alturas de saturação no fundo (20 cm e 10 cm) e diferentes carregamentos de sólidos totais (15, 28 e 42 Kg de ST/m².ano). Além disso, cada *wetland* tinha 0,0177 m² de área superficial e 50 cm de altura do meio filtrante. As unidades com maior saturação (20 cm) demonstraram as melhores eficiências médias para remoção de ST, DQO, NTK e P-PO₄³⁻, de 80%, 93%, 98% e 97%, respectivamente. Ademais, a operação com nível de saturação de 20 cm e carga de 42 kg de ST/m².ano demonstrou potencial para aplicação em novas pesquisas, notadamente na região noroeste do Rio Grande do Sul, já que possibilitou elevadas eficiências e acarreta em menor demanda de área quando comparada às demais condições testadas neste trabalho.

Palavras-Chave: Tanque Séptico. Lodo. Filtros plantados com macrófitas. Remoção de nutrientes.

ABSTRACT

IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF VERTICAL CONSTRUCTED WETLANDS FOR THE TREATMENT OF SEPTIC TANK SLUDGE

AUTHOR: Wagner Alex dos Santos

ADVISOR: Samara Terezinha Decezaro

Septic tanks are treatment units for domestic sewage that are widely used in the country. They are designed to retain and treat sewage for a certain period of time. However, this treatment generates a by-product – sludge – which must be periodically removed from the tank and sent for treatment, as it contains organic matter, nutrients and pathogenic organisms – harmful to the environment. Thus, we tried to evaluate the performance of vertical constructed wetlands (WCV) for the treatment of sludge from a septic tank. Six WCVs were deployed, acting at different saturation heights at the bottom (20 cm and 10 cm) and different loadings of total solids (15, 28 and 42 kg of ST/m².year). In addition, each wetland had 0.0177 m² of surface area and 50 cm of media height. The units with the highest saturation (20 cm) showed the best average efficiencies for removal of ST, COD, NTK and P-PO₄³⁻, of 80%, 93%, 98% and 97%, respectively. Furthermore, the operation with a saturation level of 20 cm and load of 42 kg of ST/m².year showed potential for application in new researches, notably in the northwest region of Rio Grande do Sul, as it allowed high efficiencies and resulted in lower demand area when compared to the other conditions tested in this work.

Keywords: Septic tank. Sludge. Vertical constructed wetlands. Treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Representação esquemática do funcionamento de um tanque séptico.	17
Figura 4.1 - Localização do experimento.	28
Figura 4.2 - Representação esquemática do experimento.	30
Figura 4.3 - Distribuição granulométrica da areia utilizada no experimento.	31
Figura 4.4 - Etapas de construção do experimento.	32
Figura 4.5 - Representação esquemática do preenchimento utilizado.	33
Figura 4.6 - Etapas de preenchimento do experimento.	34
Figura 5.1 - Gráfico de distribuição temporal de eficiência para os ST.	39
Figura 5.2 - Gráfico de distribuição temporal de eficiência para a DQO	40
Figura 5.3 - Gráfico de distribuição temporal de eficiência para o NTK	41
Figura 5.4 - Gráfico de distribuição temporal de eficiência para o P-PO ₄ ³⁻	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Principais métodos adotados para estabilização, desaguamento e higienização do lodo.....	21
Quadro 3.2 - Taxas de aplicação superficial adotadas por diversos autores em WCV empregados no desaguamento de lodo	25
Quadro 3.3 - Material filtrante empregado nos WC para tratamento de lodo.	26
Quadro 5.1 - Valores médios, desvios padrão e valores máximos e mínimos obtidos para o lodo de tanque séptico durante as amostragens no período de 04/10/2019 a 23/12/2019	36
Quadro 5.2 - Valores médios, desvios padrão e valores máximos e mínimos obtidos para o efluente tratado durante as amostragens no período de 04/10/2019 a 23/12/2019	37

LISTA DE APÊNDICE

Apêndice 1 - Dados Brutos das Análises de Lodo Bruto e Efluente Tratado.....	49
--	----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

WC - *Wetlands* construídos

WCV – *Wetlands* construído vertical

ETE – Estação de tratamento de esgoto

NBR – Norma Brasileira

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

TAS – Taxa de aplicação superficial

UFSC- Universidade Federal de Santa Maria

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ST – Sólidos totais

CU – Coeficiente de Uniformidade

DQO – Demanda Química de Oxigênio

NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl

P-PO₄³⁻ – Ortofosfato

pH – Potencial hidrogênioônico

SUMÁRIO

1	Introdução	13
2	Objetivos	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	Revisão bibliográfica	15
3.1	Tanque séptico e geração de lodo	15
3.1.1	Empecilhos para o tratamento do lodo de tanque séptico	19
3.2	Tecnologias de tratamento e disposição do lodo	20
3.3	Wetlands construídos verticais (WCV) para o tratamento do lodo de tanque séptico	22
3.3.1	Dimensionamento de <i>wetlands</i> construídos verticais para desaguamento de lodo	24
3.3.2	Componentes utilizados nos WCV para o tratamento de lodo	25
4	Metodologia	28
4.1	Localização do experimento	28
4.2	Descrição do Sistema Experimental	29
4.3	Ensaio granulométrico da areia	30
4.4	Etapas da construção das unidades experimentais	31
4.5	Preenchimento dos WCV	32
4.6	Operação e Monitoramento	35
5	Resultados e Discussões	36
5.1	Caracterização do Lodo Bruto	36
5.2	Caracterização do efluente tratado	36
5.3	Análise e Discussão da Eficiência dos WCV e da Qualidade do Efluente Tratado	38
6	Conclusões	44
7	Referências bibliográficas	45
8	Apêndices	49

1 INTRODUÇÃO

O baixo índice de coleta de esgotos no Brasil é um dos principais problemas de saneamento básico no País, o que fez surgir a necessidade de criar alternativas para resolver esse problema. Por conta disso, há um aumento da utilização de sistemas descentralizados, que são utilizados para fazer o tratamento de esgoto. Um tipo de sistema bastante utilizado para essa finalidade, aplicado principalmente no nível unifamiliar, é o tanque séptico.

De acordo com o IBGE (2015), o tanque séptico é utilizado em aproximadamente 15% dos domicílios brasileiros para tratar o esgoto doméstico (ABES, 2016). Essa grande utilização é pelo fato dele ser uma unidade simples e que possui um custo de construção e operação relativamente baixo, se comparado com as tecnologias utilizadas em estações de tratamento de esgoto. Por outro lado, ele necessita de uma manutenção periódica, pois ocorre uma acumulação de lodo no fundo do tanque, que precisa ser retirado, tratado e destinado de maneira ambientalmente correta.

Desse modo, existe uma procura por sistemas que possam realizar o tratamento de lodo em lugares onde não é possível implantar uma estação de tratamento de maior porte, como em localidades mais remotas na zona rural. Por conta disso, muitos autores, como Magri et al. (2016), Nielsen (2003 e 2005) e Noumsi et al. (2006), têm realizado estudos sobre o uso de sistemas descentralizados como opção para o tratamento de lodo.

Entre os sistemas mais recomendados estão os *wetlands* construídos verticais (WCV), pois eles alcançam elevadas eficiências no tratamento e são economicamente viáveis, visto que são de fácil construção e requerem operação e manutenção muito simples, em comparação com unidades convencionais utilizadas nas grandes estações de tratamento, como os leitos de secagem e unidades de desidratação mecanizadas.

Diante do exposto e considerando que os estudos sobre a aplicação de WCV no tratamento de lodo são bastante recentes e escassos no Brasil, esse trabalho se justifica pelo objetivo de verificar o desempenho de WCV, em escala de bancada, no tratamento de lodo proveniente de tanque séptico, nas condições climáticas da região noroeste do Rio Grande do Sul. Nesse estudo, foram avaliadas unidades WCV submetidas a diferentes condições operacionais e, por fim, foram verificadas as melhores condições para o sistema tratar o lodo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho dos *wetlands* construídos verticais para o tratamento de lodo de tanque séptico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- a) Construir e operar unidades experimentais para o tratamento de lodo;
- b) Avaliar a qualidade do efluente tratado, em diferentes condições operacionais, em função da remoção de sólidos totais, matéria orgânica, nitrogênio e fósforo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TANQUE SÉPTICO E GERAÇÃO DE LODO

Os tanques sépticos são unidades que constituem parte do sistema de tratamento de efluentes sanitários e são utilizados em grande escala no Brasil e no mundo para o tratamento de esgoto. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008) realizou a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico e relatou que se utilizam os tanques sépticos para tratar o esgoto de aproximadamente 12 milhões de domicílios, o que corresponde a 22% do tratamento de esgoto do Brasil. Segundo essa pesquisa, 87% das unidades são utilizadas na área urbana e apenas 13% na área rural.

A possibilidade de utilizar o tanque séptico em residências urbanas e rurais o credencia como um sistema descentralizado. Segundo Von Sperling (2005), os tanques sépticos “são unidades de baixo custo operacional que constituem uma tecnologia de tratamento natural”. Jordão e Sobrinho (2009) definem essas unidades como “sistemas de simples construção, econômicos e que praticamente não requerem manutenção – salvo uma limpeza periódica a cada dois ou cinco anos – e, por esse motivo, têm sido muito usados em todo mundo”.

Desse modo, de acordo com os autores, os tanques sépticos são economicamente viáveis porque constituem uma tecnologia de tratamento natural, de simples construção e que requerem pouca manutenção. Por conseguinte, já é possível perceber a importância dessas unidades para o tratamento dos esgotos e o motivo pelo qual elas são utilizadas em boa parte do mundo.

Segundo Suntti (2010), “os tanques sépticos são projetados para receber todos os despejos domésticos (pia da cozinha, lavanderias domiciliares, lavatórios, vasos sanitários, chuveiros, etc.)”. A autora ressalta, no entanto, que os despejos de cozinha devem passar por uma caixa de gordura antes de serem lançados nos tanques para não comprometer o sistema.

A NBR 7229 (ABNT, 1993) regulamenta a construção e operação dos tanques sépticos no Brasil e estabelece os parâmetros que devem ser levados em consideração para o dimensionamento do sistema. Este, se mal dimensionado, pode resultar em uma baixa eficiência. Todavia, é comum casos em que os encarregados pela construção dos tanques não têm o conhecimento necessário da norma e dos

principais parâmetros a serem seguidos. Dessa maneira, isso pode acarretar no comprometimento do tratamento do efluente e na vida útil do sistema.

A estrutura de um tanque séptico é constituída por tubulações de entrada e saída e por uma câmara fechada - utilizada para armazenar o esgoto por determinado período de tempo. O esgoto permanece retido na câmara pelo tempo necessário que os sólidos precisam para sedimentar. Suntti (2010) explica que a sedimentação dos sólidos ocorre devido às baixas velocidades, ou seja, o volume do tanque séptico é projetado a fim de atender a vazão afluyente e manter a baixa velocidade nas tubulações.

O esgoto efluente ao tanque é denominado efluente primário e contém os sólidos dissolvidos que não foram removidos na unidade e alguns sólidos de pequena dimensão que não sedimentam. Por esse motivo, conforme Von Sperling (2005), é necessário um tratamento complementar antes do lançamento do efluente no solo ou em um corpo hídrico.

O tratamento complementar é conhecido também como tratamento secundário e é utilizado logo após o tanque séptico. Algumas opções de tratamento secundário são abordadas por Decezaro (2016) e Von Sperling (2005), como, por exemplo, os filtros anaeróbios, os filtros de areia, as valas de filtração e os *wetlands* construídos.

Em relação ao elevado tempo de detenção hidráulica do lodo, Andrade Neto et al (1997) esclarecem que o tanque séptico permite a sua acumulação no fundo do tanque. Segundo Von Sperling (2001), o lodo é um subproduto gerado durante o tratamento do esgoto e é rico em matéria orgânica. O autor caracteriza esse subproduto como uma mistura rica em matéria orgânica (>70%), inorgânica, nutrientes, microrganismos e mais de 95% de água.

Suntti (2010) destaca que os resíduos gerados no processo de digestão ditam a frequência de limpeza do tanque séptico. O lodo fica acumulado até ser necessária a limpeza do tanque - realizada geralmente a cada um ou dois anos. O processo de digestão, cumulativamente com os outros que ocorrem dentro de um tanque séptico, serão abordados na sequência.

Os tanques sépticos conseguem manter bom funcionamento até mesmo no período próximo à limpeza, no qual pode-se observar uma alta camada de lodo acumulado. Assim, além de realizar os processos de decantação e digestão, essas unidades são capazes de manter sua eficiência até o período de limpeza (SUNTTI,

2010). A Figura 3.1 apresenta o esquema de um tanque séptico e a acumulação de lodo.

Figura 3.1 - Representação esquemática do funcionamento de um tanque séptico.



Fonte: Adaptado de ABNT-NBR 7229/93.

De acordo com a NBR 7229 (ABNT, 1993), o trabalho de um tanque séptico envolve três etapas:

- a) Retenção: O efluente encaminhado ao tanque séptico permanece retido durante um período que varia entre 12 e 24 horas. Esse tempo de permanência depende da vazão afluyente e do volume do tanque;
- a) Decantação: Nesta etapa a maior parte dos sólidos em suspensão (cerca de 70%) é sedimentada e forma a camada de lodo no fundo do tanque séptico. Algumas substâncias, como óleos, graxas e partículas de pequena dimensão, não possuem capacidade de sedimentar-se. Essas substâncias são retidas na superfície do tanque e formam uma mistura denominada espuma, que também é caracterizada como lodo;
- b) Digestão: O ambiente formado dentro de um tanque séptico propicia a digestão dos compostos orgânicos por microrganismos heterotróficos anaeróbios ou facultativos. Esses organismos realizam a digestão, tanto do lodo, como da espuma. Alguns organismos patogênicos também são destruídos nesse processo.

É fundamental que o processo de digestão seja eficiente para que as proteínas, carboidratos e lipídeos possam ser metabolizados e transformados em compostos

mais simples. Desse modo, para garantir o funcionamento do sistema com a eficiência desejada, os diferentes grupos de bactérias, responsáveis por metabolizar os compostos orgânicos citados, precisam estar em equilíbrio para que o processo ocorra da melhor maneira possível durante os quatro estágios da digestão: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese (GIRARDI, 2003).

- a) Hidrólise: Etapa inicial onde o material orgânico é convertido em substâncias mais simples que possam ser assimiladas pelas bactérias;
- b) Acidogênese: Nesta etapa, as bactérias fermentativas absorvem os compostos gerados na hidrólise e os transforma em ácidos orgânicos, que são substâncias ainda mais simples, excretadas pelas células das bactérias;
- c) Acetogênese: as bactérias convertem os produtos formados na acidogênese em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Estes elementos são substratos para a produção de metano;
- d) Metanogênese: Etapa final em que as bactérias metanogênicas produzem metano e dióxido de carbono por meio dos substratos gerados na acetogênese. Essa é a última etapa do processo de degradação anaeróbia dos compostos orgânicos.

Após os quatro estágios da digestão, apesar de o efluente estar clarificado, ele ainda apresenta elevadas concentrações de nutrientes, matéria orgânica dissolvida e organismos patogênicos (SUNTTI, 2010). Dessa forma, é necessário combinar o tanque séptico com outras unidades de tratamento capazes de realizar o tratamento secundário do efluente e melhorar sua qualidade antes do lançamento no corpo receptor.

Em relação ao lodo, este fica acumulado até que seja necessária a limpeza do tanque, a coleta e a disposição no meio ambiente. No entanto, a gestão adequada desse resíduo ainda é ausente em muitos locais, o que acarreta em riscos à saúde e ao meio ambiente, devido às suas características.

Os princípios de dimensionamento levados em consideração para a construção de um tanque séptico são: volume útil do tanque; quantidade de pessoas; contribuição per capita; tempo de detenção (dias); taxa de acumulação de lodo; e contribuição de lodo fresco (ABNT, 1993). A contribuição média de lodo fresco em residências e hotéis, segundo a norma NBR 7229 é 1 L.dia^{-1} (ABNT, 1993).

3.1.1 Empecilhos para o tratamento do lodo de tanque séptico

Segundo Von Sperling (2001), o lodo é um resíduo sólido gerado no tratamento dos esgotos e se concentra no fundo da unidade de tratamento após a sedimentação dos sólidos e também na superfície – chamado de espuma. Esse resíduo, formado basicamente por água, matéria orgânica e microrganismos, é gerado pela ação de bactérias filamentosas e bactérias formadoras de flocos. Em relação ao lodo de tanque séptico, Von Sperling (2001) destaca como característica o odor bastante desagradável devido a uma mistura anaeróbia variável.

Consoante Suntti (2010), o lodo é a parte indesejável do processo, visto que, durante o tratamento de esgoto, esse subproduto é formado e requer tratamento adequado. Quando Suntti (2010) diz que o lodo é a parte indesejável do processo, a autora se refere a toda gestão que precisa existir para esse resíduo, incluindo coleta, tratamento e transporte.

Em relação ao tratamento do lodo e o gerenciamento envolvido para tratar esse resíduo, é preciso expor que as estações de tratamento de esgoto (ETEs) dos grandes centros urbanos geralmente possuem tecnologias para tratar o lodo dentro da própria estação. Além disso, possuem uma logística para realizar o transporte, quando preciso, do lodo já tratado para aterros sanitários ou outras formas de destinação ambientalmente adequadas.

A grande problemática concentra-se nas alternativas para o tratamento do lodo de tanque séptico em cidades que não possuem condições econômicas de ter uma estação de tratamento de esgoto capaz de contemplar também, o tratamento do lodo proveniente de tanques sépticos. São nesses lugares que as alternativas para o tratamento descentralizado podem ser bem aproveitadas.

Nos centros urbanos, é possível observar que a limpeza dos tanques sépticos é realizada por caminhões conhecidos popularmente como “limpa-fossas”, que, na maioria das vezes, pertencem a empresas terceirizadas. Conforme Suntti (2010), essas empresas, em muitos casos, não garantem o tratamento e a destinação ambientalmente adequada dos resíduos. Em residências rurais, a situação é pior porque muitas vezes a coleta e o gerenciamento do lodo acumulado nos tanques sépticos são inexistentes.

Assim que o caminhão limpa-fossa realiza a limpeza do tanque, todo o conteúdo é removido, ou seja, o caminhão faz o esgotamento de uma mistura de

esgoto com lodo. Devido a esse fato, o lodo pode apresentar grande variação nas suas características (matéria orgânica e nutrientes), e isso dificulta a escolha da tecnologia de tratamento.

3.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO DO LODO

Nos últimos anos, as ETEs tiveram que se adaptar e implementar as tecnologias necessárias para o tratamento e gerenciamento do lodo (SUNTTI, 2010). Considerando que as estações das grandes cidades possuem condições financeiras de adquirir essas tecnologias, o tratamento do resíduo é realizado dentro da própria ETE.

Jordão e Além Sobrinho (2009) destacam que a necessidade de tratar o lodo fez surgir investimentos em tecnologias de tratamento. Isso proporcionou aumento significativo no tratamento do lodo gerado dentro das ETEs. Os autores inserem nesse contexto não somente o lodo gerado em ETEs, mas também aquele gerado em tanques sépticos. Este ainda recebe pouca atenção, assim como os sistemas descentralizados, que são negligenciados e deveriam receber mais suporte técnico e financeiro.

De acordo com Suntti (2010) e Jordão e Além Sobrinho (2009), é notório que as tecnologias de tratamento de lodo já existem e estão sendo bem utilizadas, porém, o tratamento do lodo gerado nos sistemas descentralizados, especialmente nos tanques sépticos, ainda carece de tais tecnologias.

Andreoli et al. (2007) também abordam a mesma situação, em que os investimentos são feitos somente nos grandes centros. Em contrapartida, nas cidades menores, onde prevalecem os sistemas descentralizados, é dada pouca ou nenhuma atenção. Os autores dizem que em algumas regiões o lodo é encaminhado para a ETE mais próxima, porém, a maior parte gerada nas unidades sépticas é inadequadamente disposta no solo e em corpos hídricos.

Nas ETEs, o lodo é submetido aos processos de: estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica, quando necessário; desaguamento - que visa a remoção da umidade e do volume do lodo; e a higienização - que tem o objetivo de remover os organismos patógenos. No Quadro 3.1, são apresentados os principais métodos adotados para estabilização, desaguamento e higienização do lodo.

Quadro 3.1 - Principais métodos adotados para estabilização, desaguamento e higienização do lodo.

Estabilização	Digestão anaeróbia/aeróbia Tratamento químico (alcalinização) Compostagem Secagem térmica (peletização)	
Desaguamento	Adensamento ou espessamento	Gravidade Flotação por ar dissolvido Centrífuga
	Desaguamento ou desidratação	Leitões de secagem Lagoas de lodo Centrífugas Filtros a vácuo Filtros prensa Prensas desaguadoras
Higienização	Compostagem Digestão aeróbia autotérmica Caleação ou estabilização alcalina Pasteurização Secagem térmica Incineração Oxidação úmida	

Fonte: Adaptado de Andreoli, Von Sperling e Fernandes, 2001.

Dessa maneira, é possível notar que existem diversas alternativas para o tratamento do lodo em sistemas centralizados e a tendência é que todas as ETEs se adequem a fim de possuir as tecnologias necessárias para o tratamento do resíduo. No entanto, é fundamental haver melhorias no gerenciamento do lodo gerado nos sistemas simplificados. De acordo com Pereira et al. (2009), um dos motivos pelos quais os lodos dos tanques sépticos são dispostos incorretamente no meio ambiente é porque o próprio morador responsável pelo sistema, muitas vezes, prefere realizar a limpeza por conta própria para evitar os gastos com as empresas ou com órgãos responsáveis pelo serviço. O autor também ressalta que a limpeza, quando realizada pelos caminhões limpa-fossa, dificulta o tratamento do lodo, pois é realizada a coleta de todo o conteúdo do tanque, e não somente do lodo. Esse problema também é abordado por Rocha e Sant'Anna (2005). Os autores expõem que, em diversos casos, não há controle e monitoramento das descargas desse tipo de lodo nas ETEs, o que compromete a eficiência do sistema devido às elevadas concentrações orgânicas presentes nos lodos de tanques sépticos.

Desse modo, a problemática não está direcionada exclusivamente ao lodo gerado pelas ETEs, pois para este existe tratamento, mas sim para o lodo proveniente dos tanques sépticos. Nesse sentido, pesquisadores têm estudado alternativas para

o tratamento descentralizado do lodo, que sejam eficientes e, ao mesmo tempo, viáveis economicamente. Os esforços são direcionados principalmente na busca por uma tecnologia que possa realizar o tratamento do lodo em residências e/ou conjunto de residências que possuam tanque séptico.

Entre as tecnologias possíveis de serem utilizadas, Suntti (2010) destaca a utilização de filtros plantados com macrófitas (*wetlands* construídos verticais), que visam o desaguamento, a desidratação e a mineralização do lodo de tanque séptico. Após o tratamento, existem alternativas para dispor o lodo, como aterros sanitários e áreas agrícolas. Quando disposto em áreas agrícolas, o lodo precisa passar pelos processos de desaguamento e desinfecção. Já quando disposto em aterros sanitários, ele precisa passar pelo processo de desaguamento para reduzir custos com transporte e disposição final (VON SPERLING, 2001).

3.3 WETLANDS CONSTRUÍDOS VERTICAIS (WCV) PARA O TRATAMENTO DO LODO DE TANQUE SÉPTICO

Primeiramente, é importante destacar que os *wetlands* construídos (WC) surgiram a partir dos *wetlands* naturais. De acordo com Von Sperling (2005), os *wetlands* são terras alagadas que abrigam plantas aquáticas e fazem parte do ecossistema natural. Esse ecossistema, geralmente encontrado em regiões pantanosas, forma um mecanismo capaz de agir como um filtro que remove uma série de poluentes encontrados nas águas, como matéria orgânica, organismos patogênicos e metais pesados. Devido ao ambiente propício para o desenvolvimento das plantas aquáticas e diversos grupos de micro-organismos, os *wetlands* naturais são eficientes também na remoção de nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo (VON SPERLING, 2005)

A partir do estudo e do conhecimento da capacidade dos *wetlands* naturais de realizar o tratamento de efluentes, surgiram os *wetlands* construídos, também conhecidos como filtros plantados com macrófitas. Segundo Decezaro (2016), os WC surgiram a partir da intenção de aproveitar os processos que naturalmente ocorrem nos *wetlands* naturais, mas com a possibilidade de controlar e monitorar o tratamento. A autora também destaca que os processos envolvidos são físicos, químicos e biológicos e que os micro-organismos são os principais responsáveis pelo tratamento.

Ela também ressalta o papel fundamental das plantas, que promovem uma área de aderência para o desenvolvimento dos micro-organismos e removem os nutrientes.

Os primeiros WC foram desenvolvidos na Alemanha por volta de 1950 (KADLEC e WALLACE, 2009). Nos anos seguintes, o sistema difundiu-se pela Europa e atualmente é utilizado por diversos países, entre eles: Holanda, Reino Unido, Alemanha e França. No Brasil, a utilização dos WC surgiu em 1980, quando Salati e Rodriguez (1999) conduziram os primeiros experimentos.

Logo, percebe-se que os primeiros sistemas não foram projetados para o tratamento do lodo, mas para o de esgoto. A ideia de utilizar os *wetlands* construídos verticais (WCV) - uma das modalidades de WC - para o tratamento do lodo converge com a necessidade de desenvolver tecnologias simplificadas e economicamente viáveis para tratar os resíduos de tanque séptico em lugares onde não é possível realizar o tratamento por meio das estações de tratamento de efluentes convencionais (centralizadas).

Quando o lodo é disposto no WCV, é comum dizer que o sistema está sendo alimentado, pois os micro-organismos e as plantas macrófitas utilizam os nutrientes desse lodo para se desenvolver e desempenhar suas funções. A partir disso, é possível explicar o funcionamento do sistema. De modo geral, o lodo é aplicado na superfície do WCV e, conforme percola pela ação da gravidade, os materiais filtrantes que compõem o filtro promovem a separação da fase sólida e líquida. A fase líquida gera o efluente tratado no final do sistema e a fase sólida são os sólidos que permanecem no sistema e que formam um subproduto seco e/ou desidratado (Suntti, 2010).

Os sólidos orgânicos - retidos pelo WCV - presentes no lodo sofrem o processo de mineralização. Isso significa que as substâncias orgânicas são convertidas em inorgânicas. Segundo Nielsen et al. (2007), esse processo reduz o volume de lodo no WC e aumenta a vida útil do sistema. Segundo Uggetti et al. (2009), a mineralização é um processo que torna o lodo estabilizado, ou seja, ocorre um decréscimo de matéria orgânica devido, principalmente, à respiração microbiana.

Assim, levando em consideração a separação da fase sólida e líquida abordada por Suntti (2010); a redução do volume de lodo abordada por Nielsen et al. (2007); e a estabilização do lodo abordado por Uggetti et al. (2009), pode-se dizer que os mecanismos de tratamento que ocorrem nos WC com macrófitas aquáticas são os

mesmos mecanismos utilizados dentro das ETEs. Não obstante, os WC ainda proporcionam um ambiente capaz de eliminar organismos patógenos.

Nielsen (2003) expõe a importância dos WC serem alimentados em bateladas (ciclos). Então, após a aplicação do lodo, existe um período que varia entre alguns dias ou semanas, no qual o filtro permanece em repouso. Segundo o autor, esse período de repouso, entre uma batelada e outra, permite que o processo de desaguamento do lodo seja realizado.

Além da alimentação em batelada, a saída final do sistema é outro fator que auxilia na qualidade final do efluente. Stefanakis et al. (2014) recomendam que a saída do sistema permaneça fechada por um período entre 2 e 12 dias. Segundo Stefanakis et al. (2014), isso permite um maior tempo de tratamento para o líquido percolado.

Stefanakis et al. (2014) abordam a vida útil dos WC. Segundo os autores, uma camada de lodo desenvolve-se sobre o sistema conforme a aplicação das bateladas. Essa camada aumenta gradativamente até atingir a altura máxima do WCV (borda livre). Quando isso acontece, a alimentação deve ser interrompida até todo o lodo do WCV ser mineralizado. Após a mineralização completa, o lodo pode ser removido do WCV.

De maneira geral, os WCV proporcionam um tratamento eficiente para o lodo, possuem baixo custo de implantação e se caracterizam por ser uma tecnologia de fácil operação e manutenção, além de que necessitam uma demanda de área relativamente baixa, quando comparados com as tecnologias utilizadas nas ETEs (SUNTTI, 2010). No entanto, os WCV necessitam ser projetados, operados e monitorados adequadamente para que alcancem boa eficiência no desaguamento e na mineralização do lodo (NIELSEN, 2005).

3.3.1 Dimensionamento de *wetlands* construídos verticais para desaguamento de lodo

Os WCV para o tratamento de lodo não possuem um dimensionamento padronizado. Atualmente, os sistemas são dimensionados de acordo com a taxa de aplicação superficial (TAS), que representa a massa de sólidos totais aplicada no sistema por unidade de área e de tempo. Essa taxa de aplicação permite calcular as dimensões do WC (STEFANAKIS et al. 2014).

Segundo Stefanakis et al. (2014), o dimensionamento dos WC pode ser calculado também em função do volume de lodo que será tratado. O volume de lodo é calculado de acordo com o número de habitantes que serão atendidos e com a contribuição média de lodo por habitante no período de um ano. Segundo Von Sperling (2001), essa contribuição varia de 0,3 a 1,0 L/hab.dia. A maioria dos autores, como Klingel (2001), Gonçalves (2001) e Von Sperling (2001) recomenda adotar 0,3 L/hab.dia.

A recomendação da TAS, segundo Stefanakis et al (2014), para lodos digeridos em condições anaeróbicas é de 13 - 60 kg ST/m².ano. No Quadro 3.2, são apresentadas as TAS recomendadas por alguns autores. A maioria dos autores abordam as TAS para WC que recebem lodo proveniente de ETEs. Os WC que recebem lodo de tanque séptico são abordados por Koottatep et al. (1999) e Koné e Strauss (2004).

Quadro 3.2 - Taxas de aplicação superficial adotadas por diversos autores em WCV empregados no desaguamento de lodo

Autores	TAS¹ (kg ST.m⁻².ano⁻¹)	Frequência de aplicação (dias.semana⁻¹)	Tempo de detenção (dias)
Koottatep et al., 1999a	125 - 250	1 - 2	2 - 6
Koné e Strauss, 2004	≤ 250	1	-
Noumsi et al., 2006	≤ 200	1 - 2	-
Kim e Smith, 1997	16 - 106	-	-
Nielsen, 2003 e 2005	50 - 60	-	-
Cooper et al., 1996	80	1	-

Fonte: Diversos Autores.

Desse modo, percebe-se que as TAS são maiores para os WC que recebem lodo de tanque séptico. Isso ocorre porque o tanque séptico é projetado para que o lodo seja digerido/estabilizado nessa unidade. Além disso, algumas unidades utilizadas nas ETEs, como reator UASB e lodos ativados de aeração prolongada, também são eficientes na digestão/estabilização do lodo.

3.3.2 Componentes utilizados nos WCV para o tratamento de lodo

¹Taxa de Aplicação Superficial

Segundo Suntti (2010), os WCV são constituídos por material filtrante, sistema de drenagem do líquido percolado e plantas macrófitas. Além disso, os WCV direcionados para tratar o lodo possuem uma borda com pelo menos 20 cm de sobra, o que permite o acúmulo da camada de lodo. Os componentes do sistema são descritos a seguir.

3.3.2.1 *Materiais filtrantes*

Os materiais filtrantes auxiliam no crescimento das bactérias responsáveis pelo tratamento de lodo, dado que serve de suporte para o desenvolvimento de colônias responsáveis pelos processos de depuração da matéria orgânica, transformação da série nitrogenada e adsorção de fósforo (KOOTTATEP et al. 1999). Eles são responsáveis também por reter os sólidos em suspensão presentes no lodo.

Os materiais filtrantes são compostos por cascalho e areia - dispostos nos WC de modo a formar uma altura entre 50 cm e 70 cm. Cooper (2004) recomenda utilizar várias camadas de cascalho e areia em uma profundidade de aproximadamente 65 cm. O autor explica que a utilização de várias camadas de cascalho com granulometrias diferentes auxilia na manutenção das condições hidráulicas do sistema. No Quadro 3.3, são apresentadas algumas recomendações das camadas dos materiais filtrantes.

Quadro 3.3 - Material filtrante empregado nos WC para tratamento de lodo.

Autores	Camadas de material filtrante			
	1ª camada (fundo)	2ª camada	3ª camada	Última camada (superfície)
Koottatep et al., 1999a	10 cm (areia fina)	15 cm (cascalho peq.)	40 cm (cascalho grande)	
Yubo et al., 2008	10 cm (areia grossa)	10 cm (areia fina)	20 cm (cascalho peq.)	20 cm (cascalho grande)
Nielsen, 2003	15 cm (areia)	30 cm (cascalho pequeno)	40 cm (seixo grande)	

Fonte: Koottatep et al., 1999a, Yubo et al., 2008 e Nielsen, 2003.

Logo, é possível perceber variabilidade na composição das camadas, entretanto, todos os autores recomendam a utilização de camadas com diferentes granulometrias, fazendo uso de areia grossa, areia fina, cascalho grande e cascalho pequeno.

3.3.2.2 *Sistema de drenagem do líquido percolado*

O sistema de drenagem consiste em uma tubulação de saída, que pode ser visualizada do lado de fora do sistema, e de uma tubulação ligada à de saída, que permanece dentro do WC na parte inferior. Essa tubulação, na parte inferior do filtro, é perfurada e forma canais de passagem, o que permite que o líquido possa ser encaminhado para fora do sistema. O diâmetro das tubulações depende da dimensão do WC e normalmente é superior a 50 mm (KOOTTATEP et al. 1999).

3.3.2.3 *Plantas macrófitas*

As plantas macrófitas são responsáveis pela retirada de nitrogênio e de fósforo do lodo, uma vez que utilizam esses nutrientes como fonte de alimento para o seu desenvolvimento. As macrófitas também auxiliam na formação de colônias de microrganismos, pois suas raízes promovem uma área disponível para a aderência de bactérias, que auxiliam no tratamento do lodo (SUNTTI, 2010).

Geralmente, no momento em que as macrófitas atingem um crescimento elevado, as taxas de absorção de nutrientes tendem a diminuir. Por causa disso, Pelissari et al. (2019) ressaltam a importância de realizar a poda ou, se necessário, o replantio das plantas. Ainda, é preciso destacar que as macrófitas têm a capacidade de armazenar os nutrientes em sua estrutura, portanto, quando podadas ou retiradas, elas devem ser destinadas adequadamente para não poluir o meio ambiente. Ainda é preciso ressaltar que para o tratamento de lodo, as macrófitas utilizadas devem ser do tipo emergentes, pois estas permanecem enraizadas no material filtrante, enquanto suas folhas, fora da água.

4 METODOLOGIA

4.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido em dois locais distintos da UFSM – Campus Frederico Westphalen. O monitoramento dos filtros pilotos ocorreu na área anexa ao laboratório de pilotos que existe no prédio da mecanização. Já as análises foram realizadas no Laboratório de Recursos Hídricos. Além do mais, o lodo aplicado nos filtros era coletado no tanque séptico, que recebe o esgoto doméstico da casa do estudante (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Localização do experimento.



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2020.

4.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

Foram utilizados *wetlands* construídos de escoamento vertical (WCV) para tratar o lodo do tanque séptico da casa do estudante. O sistema experimental foi construído entre os meses de agosto e setembro de 2019.

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos WCV na remoção de sólidos totais (ST), matéria orgânica, nitrogênio e fósforo, foram implantados 6 WCV (três pares, sendo que cada par operando com diferentes carregamentos de ST), cada um com 0,0177 m² de área superficial. Cada par de WCV, como citado previamente, trabalhou em diferentes condições operacionais, ou seja, três diferentes taxas de aplicação de sólidos totais foram utilizadas (a quantidade de ST é o parâmetro utilizado para definir qual taxa será aplicada em cada WCV, uma taxa para cada par). Desse modo, considerando que a recomendação da taxa de aplicação de ST, segundo Stefanakis et al. (2014) é de 13 a 60 Kg de ST/m².ano, foi decidido previamente que as três taxas seriam 25, 50 e 75 Kg de ST/m².ano. A ideia desta última taxa de aplicação (75 Kg de ST/m².ano) foi verificar o desempenho de um WCV trabalhando acima do recomendado.

No entanto, não foi possível aplicar essas taxas programadas. Estimava-se que a concentração de sólidos totais no lodo bruto seria, segundo Magri et al. (2016), em torno de 11 mil mg/l. Porém, a concentração média de sólidos totais das coletas realizadas ficou no valor de 6835 mg/L. Portanto, considerando que os volumes de lodo aplicados foram de 0,7, 1,4 e 2,1 L/semana (1 volume para cada par), as taxas de aplicação ficaram no valores de 15, 28 e 42 Kg de ST/m².ano.

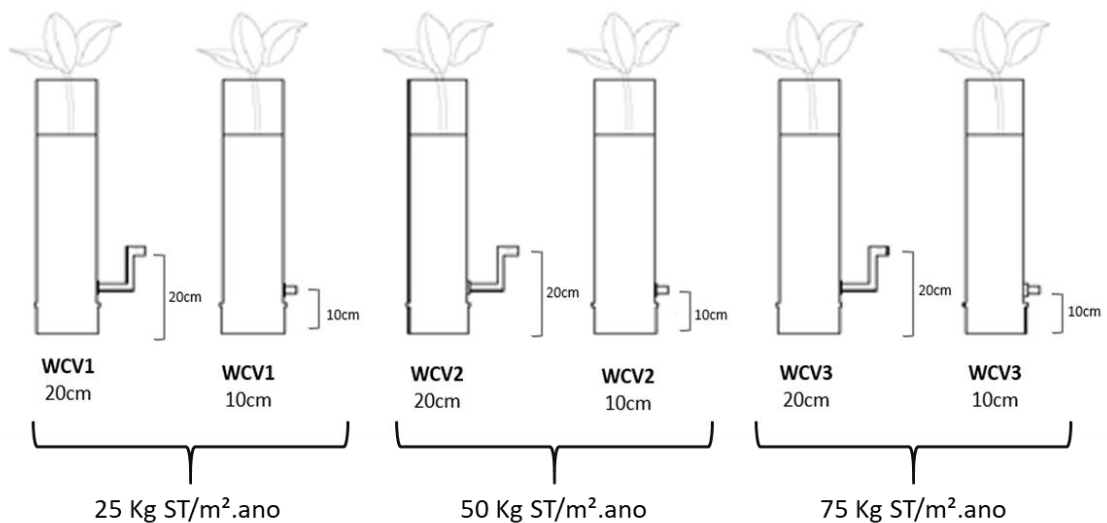
Além disso, para aumentar a variação das condições operacionais e encontrar a mais eficiente, em cada par de WCV (unidades com a mesma taxa de aplicação de sólidos), posicionou-se as saídas do efluente em níveis diferentes (10 cm e 20 cm do fundo de cada WCV), formando o que chamamos de “WCV – 10 cm” e “WCV – 20 cm”. Essa nomenclatura foi dada em razão da altura da saída do efluente do fundo WCV, ou seja, tem-se três WCV com a saída a 10 cm do fundo da unidade experimental, além de outros três com a saída a 20 cm do fundo da unidade.

Ainda, é importante mencionar, como dito anteriormente, que para cada par de *wetlands* que atuou com a mesma carga de ST, a diferença entre eles ocorreu propriamente pela altura da saída do efluente. Isso foi projetado com o objetivo de

aumentar a variação, não só da diferença de carga de ST entre os pares de filtros, mas também entre os filtros com a mesma carga.

Por fim, é preciso destacar o motivo pelo qual os WCV que receberam a mesma carga de ST foram projetados com diferentes alturas para a saída do efluente. Isso se justifica pelo intuito de projetar um fundo saturado para algumas unidades, quer dizer, aqueles WCV com a saída a 20 cm tiveram uma maior saturação no fundo. O objetivo disso é proporcionar uma maior reserva de água e nutrientes para que os microrganismos possam desempenhar melhor os processos de remoção dos poluentes do lodo e, posteriormente, verificar se esse processo aumentou a eficiência dos filtros. Além disso, o fundo saturado também aumenta o tempo de contato dos microrganismos com o efluente, o que proporciona maior remoção dos poluentes. A Figura 4.2 ilustra o esquema utilizado no experimento.

Figura 4.2 - Representação esquemática do experimento.

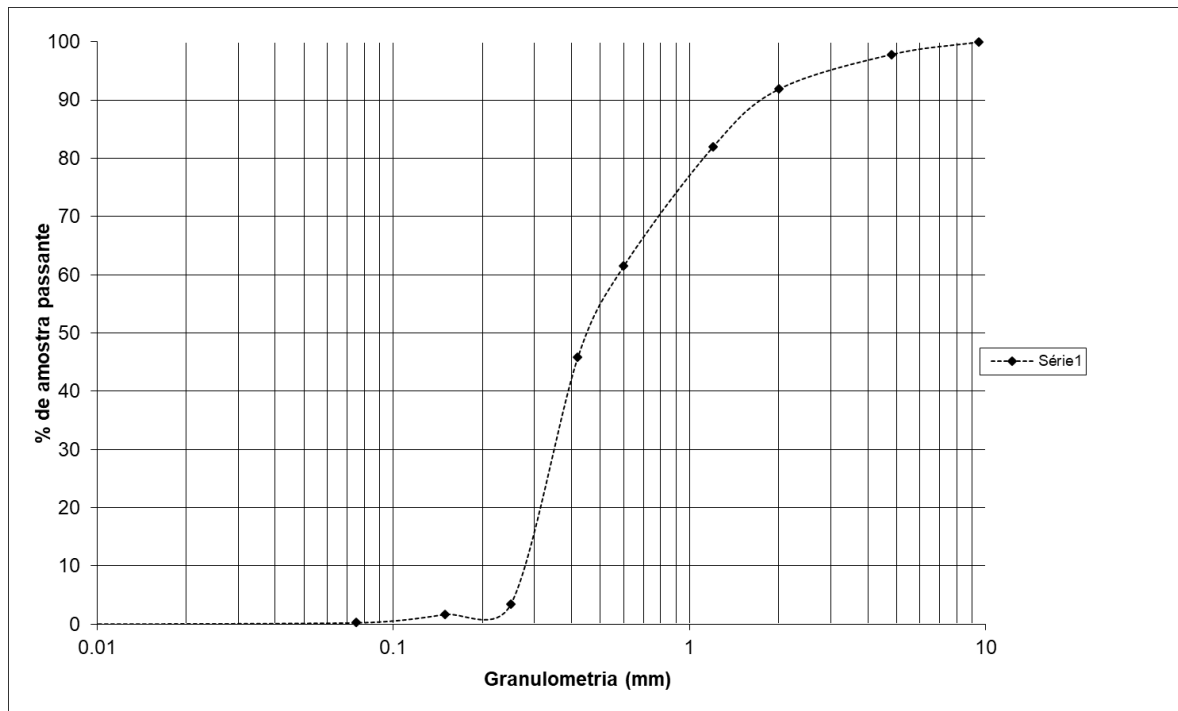


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 ENSAIO GRANULOMÉTRICO DA AREIA

O ensaio granulométrico da areia utilizada no preenchimento dos WCV foi realizado de acordo com a NBR 7217 (ABNT, 1987). Os coeficientes obtidos a partir da curva granulométrica foram: $D_{10} = 0,28$ mm; $D_{60} = 0,6$; coeficiente de uniformidade (CU) = 2,13, conforme Figura 4.3.

Figura 4.3 - Distribuição granulométrica da areia utilizada no experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 ETAPAS DA CONSTRUÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS

As unidades experimentais foram montadas em colunas, com tubos PVC de 150 mm de diâmetro e caps (Figura 4.4). Após a montagem, todas as colunas foram testadas com água, com o objetivo de verificar possíveis vazamentos. Desse modo, logo após a confirmação de que elas estavam aptas a receber o lodo, foi dado prosseguimento no trabalho.

Posteriormente, construiu-se a estrutura que comportaria os WCV e, a partir disso, eles foram incorporados a ela, conforme detalhamento ilustrativo ainda na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Etapas de construção do experimento.



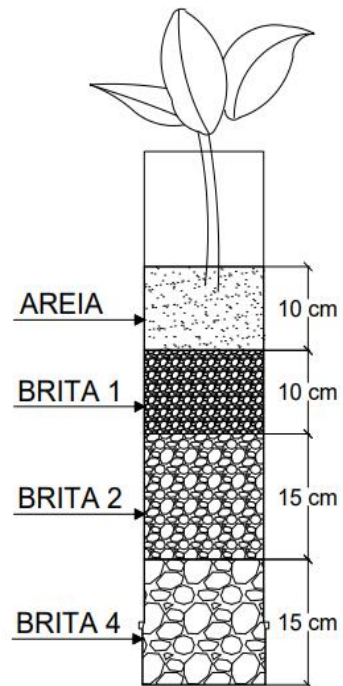
Fonte: Acervo do autor.

4.5 PREENCHIMENTO DOS WCV

Para preencher os WCV utilizou-se brita tipo 1, 2 e 4 (19, 25 e 50mm, respectivamente) e areia. Todo o preenchimento dos filtros foi feito manualmente.

Os 4 materiais - diferentes granulometricamente - foram divididos em 4 camadas nos WCV. Além do mais, as maiores granulometrias foram dispostas na parte inferior do filtro, para viabilizar um correto tratamento. A disposição das camadas está exemplificada na Figura 4.5 e as etapas de preenchimento realizadas estão ilustradas na Figura 4.6.

Figura 4.5 - Representação esquemática do preenchimento utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.6 - Etapas de preenchimento do experimento.



Preenchimento dos filtros



Medição da altura das camadas



Preenchimento inicial com brita tipo 4



Preenchimento com brita tipo 2



Preenchimento com brita tipo 1



Preenchimento final com areia



Seleção das macrófitas utilizadas



Disposição do filtro após o preenchimento



Disposição final do filtro após o preenchimento

Fonte: Acervo do autor.

4.6 OPERAÇÃO E MONITORAMENTO

O sistema começou ser operado dia 20/09/2019 e foi monitorado de 04/10/2019 até 23/12/2019 e inicialmente foi instalado em local fechado. Porém, verificou-se que as plantas não se desenvolveriam devido à ausência de luz solar. Desse modo, posteriormente o sistema foi instalado em local aberto – sujeito à variações climáticas - onde foi operado até o fim do monitoramento. Os parâmetros analisados foram ST, DQO, NTK e Ortofosfato. As análises foram realizadas de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al. 2012).

A alimentação dos *wetlands* era semanal e para coletar o lodo no tanque séptico da Casa do Estudante utilizou-se um coletor, montado com um cabo de madeira e um Becker de plástico acoplado ao cabo. Ao todo, foram realizadas 7 análises.

Também é importante destacar que, de acordo com Magri et al. (2016), como dito anteriormente, o valor dos ST do lodo é em torno de 11 mil mg/L. Desse modo, a coleta do lodo do tanque séptico era realizada de maneira que os ST ficassem próximo desse valor. Mesmo assim, devido a alguns fatores, como contribuição per capita e características do lodo, esse valor sofria variações em cada análise, o que é perfeitamente normal. Por esse motivo a concentração média dos sólidos totais ficou no valor de 6835 mg/L.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO BRUTO

Inicialmente, serão apresentados os resultados da caracterização do lodo e, logo após, conforme Quadro 5.1, será feita uma discussão sobre esses resultados. No Apêndice 1 estão apresentados os dados brutos obtidos em cada amostragem de lodo.

Quadro 5.1 - Valores médios, desvios padrão e valores máximos e mínimos obtidos para o lodo de tanque séptico durante as amostragens no período de 04/10/2019 a 23/12/2019

Dados estatísticos	Concentrações (mg/L)				T (°C)	pH
	ST	DQO	NTK	P-PO ₄ ³⁻		
Média	6835,14	6122,32	504	98,80	24,80	7,08
Desvio Padrão	3887,84	3270,90	355,28	50,44	1,21	0,54
Máximo	11987	8028,77	980	109,37	25,90	7,80
Mínimo	2113	3396,11	126	85,04	23,60	6,30

Ao analisar os resultados, é possível perceber uma grande diferença entre os valores máximos e mínimos, o que acarretou um elevado desvio padrão. Isso pode ter ocorrido em razão da variação das características do esgoto afluente ao tanque séptico. Existem algumas razões para essa variação. Entre as principais, podem-se destacar a contribuição per capita e as mudanças climáticas (VON SPERLING, 2001).

É importante comparar o valor obtido da concentração do lodo (6835 mg/L) com outros autores. No trabalho realizado por Carrilho e Carvalho (2016), foi encontrado, para o lodo proveniente de tanque séptico, uma concentração de sólidos totais em torno de 4000 mg/L. Para Magri et al. (2016), a concentração média de sólidos totais no lodo ficou em 11000 mg/L.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE TRATADO

A seguir, no Quadro 5.2, assim como foi feito para o lodo, serão apresentados os resultados obtidos para o efluente drenado/tratado, após o desaguamento do lodo

nos WCV. Então, serão apresentadas os quadros com os valores referentes a todos os WCV e, em seguida, esses valores serão discutidos.

No Apêndice 1 estão apresentados os dados brutos obtidos em cada amostragem de efluente dos WCV.

Quadro 5.2 - Valores médios, desvios padrão e valores máximos e mínimos obtidos para o efluente tratado durante as amostragens no período de 04/10/2019 a 23/12/2019

Dados estatísticos	Concentrações (mg/L)				T (°C)	pH
	ST	DQO	NTK	P-PO ₄ ³⁻		
WCV I - 20 cm						
Média	1313,83	348,27	7,81	3,27	23,87	6,81
Desvio Padrão	693,08	174,25	2,81	1,76	2,32	0,32
Máximo	2180	410,35	12,60	4,20	26,80	7,34
Mínimo	650	218,42	4,20	2,61	21,20	6,51
WCV I - 10 cm						
Média	2020,50	1053,84	19,60	14,04	23,90	7,06
Desvio Padrão	1002,94	495,60	9,94	7,49	2,44	0,22
Máx	2950	1216,42	35	17,73	27,30	7,30
Mín	1260	849,03	9,10	11,99	21,50	6,70
WCV II - 20 cm						
Média	1556,16	388,48	11,66	5,12	23,67	6,80
Desvio Padrão	790,44	177,57	4,57	2,73	2,30	0,48
Máx	2440	437,66	16,80	6,45	26,90	7,59
Mín	900	339,06	5,60	4,30	21,50	6,24
WCV II - 10 cm						
Média	1891,66	918,06	24,38	15,45	23,82	6,91
Desvio Padrão	929,97	517,80	15,81	9,18	2,41	0,27
Máx	2690	1268,52	56	21,47	27,30	7,29
Mín	950	569,36	11,90	9,31	21,80	6,58
WCV III - 20 cm						
Média	1462,16	506,12	18,20	4,56	23,67	6,84
Desvio Padrão	716,48	231,25	5,75	2,67	2,61	0,32
Máx	2240	563,89	28,70	6,53	27,40	7,42
Mín	920	432,28	12,60	3,47	21,50	6,60
WCV III - 10 cm						
Média	1996,16	1264,22	30,45	21,24	23,57	6,75
Desvio Padrão	949,87	746,09	10,88	11,38	2,62	0,22
Máx	2710	1923,80	42	25,40	27,30	7
Mín	950	635,17	17,50	15,66	21,30	6,53

De início, ao fazer uma análise geral, pode-se observar que os WCV – 20 cm obtiveram melhores resultados no tratamento, ou seja, os *wetlands* com o fundo saturado, em virtude da elevação da tubulação de saída, apresentaram desempenho mais satisfatório em comparação com os WCV – 10 cm. É possível perceber isso olhando para os valores médios dos parâmetros analisados e notando que eles sempre foram menores para WCV – 20 cm, ou seja, as unidades experimentais com fundo saturado removeram os poluentes do lodo com mais eficiência.

Essa maior eficiência ocorreu em razão dos WCV – 20 cm armazenarem certa quantidade do lodo percolado, o que propiciou maior tempo de detenção hidráulica e, conseqüentemente, mais tempo para que os microrganismos pudessem realizar o tratamento do lodo.

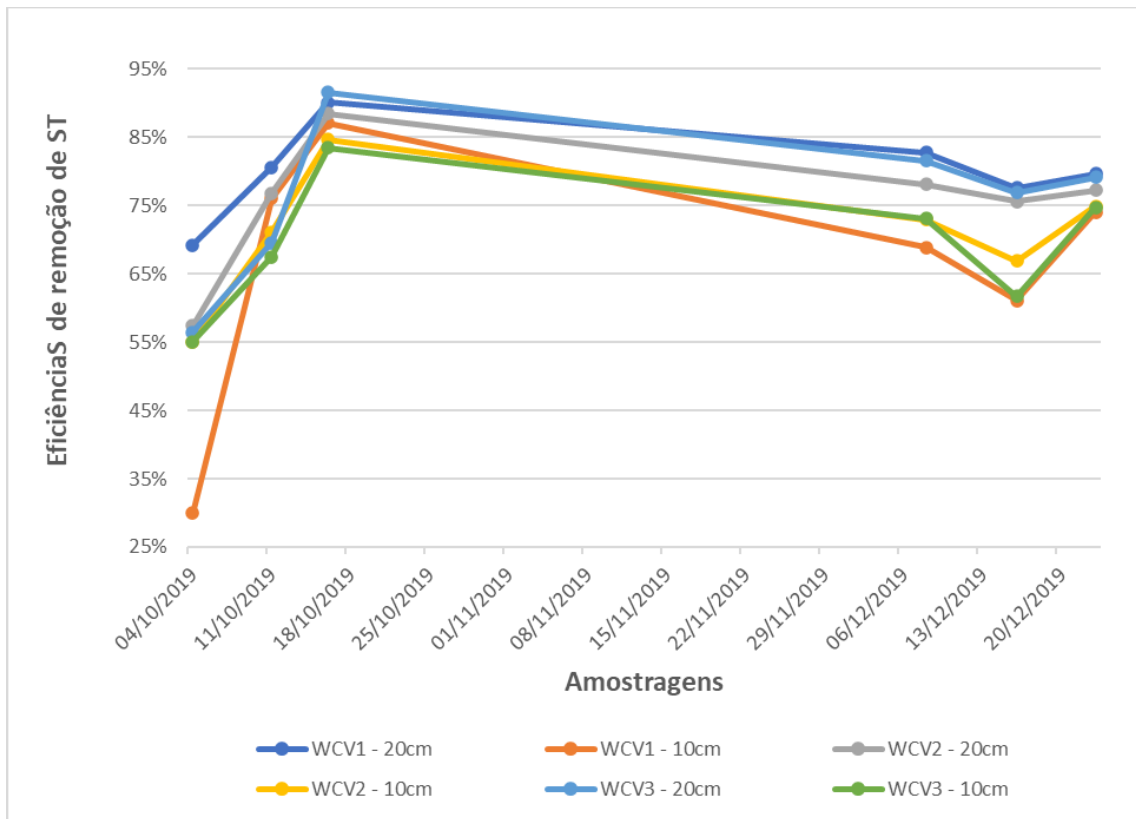
Em relação ao pH, é possível perceber que os valores para os WCV – 20 cm foram menores. Isso é consequência do fundo saturado com lodo, que propiciou maior remoção dos poluentes. Desse modo, considerando que a remoção da matéria orgânica carbonácea e a nitrificação consomem a alcalinidade do meio, os valores de pH foram menores para os WCV – 20 cm, o que indica maior remoção de poluentes nesses *wetlands* (Von Sperling, 2016).

5.3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DA EFICIÊNCIA DOS WCV E DA QUALIDADE DO EFLUENTE TRATADO

Em seguida, serão apresentados os gráficos de distribuição temporal que mostram a eficiência de cada WCV para os parâmetros analisados e, na sequência, será analisada a eficiência de cada *wetland*. Além disso, cada parâmetro será analisado separadamente e, por fim, serão discutidos os motivos pelos quais algumas unidades obtiveram melhores resultados em comparação com as outras.

A Figura 5.1 apresenta a distribuição temporal de eficiência para ST.

Figura 5.1 - Gráfico de distribuição temporal de eficiência para os ST.



Os WCV – 20 cm obtiveram maiores eficiências na remoção dos ST (WCV 1 - 20 cm = 80%; WCV 2 - 20 cm = 76%; WCV 3 - 20 cm = 76%). Os WCV - 10 cm atingiram eficiências menores (WCV 1 - 10 cm = 66%; WCV 2 - 10 cm = 71%; WCV 3 - 10 cm = 69%). O WCV 1 - 20 cm atingiu a maior eficiência (80%) e trabalhou com um carregamento de 15 Kg de ST/m².ano. Em comparação com Magri et al. (2016), que foram os autores utilizados como referência neste trabalho para encontrar a concentração de sólidos totais do lodo (11 g/l), o WCV 1 – 20 cm obteve uma eficiência um pouco menor para este parâmetro (ST), pois o trabalho dos autores atingiu 93% de eficiência.

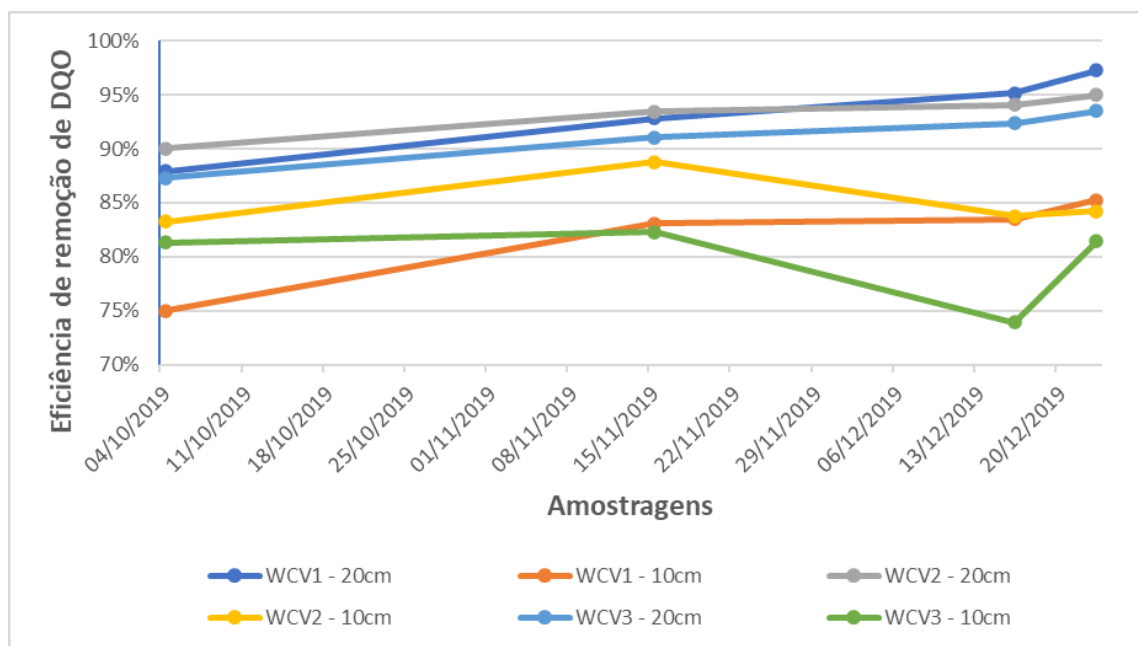
Um aspecto importante para se discutir é que, apesar de o WCV 1 – 20 cm ter atingido a maior eficiência (80%), os outros dois WCV – 20 atingiram eficiências próximas (76%). Logo, para as condições climáticas do local de estudo, no que se refere à remoção de ST recomendam-se condições as operacionais do WCV 3 – 20 cm, pois essa unidade obteve uma elevada eficiência, mesmo recebendo o maior carregamento de ST (42 Kg de ST/m².ano), o qual está dentro da faixa recomendada pela literatura especializada (Quadro 3.2). Isso o torna, além de eficiente,

economicamente mais viável, pois como ele recebe um maior carregamento de ST, a demanda de área que necessita para realizar o tratamento será menor.

A maior eficiência dos WCV – 20 cm ocorreu em virtude deles possuírem o fundo saturado com lodo, que forneceu uma maior reserva de nutrientes para que os microrganismos pudessem manter seu metabolismo acelerado e desempenhar suas atividades de degradação da matéria orgânica do lodo. Além disso, o maior tempo de detenção hidráulica do lodo, fornecido pelo fundo saturado, propiciou maior tempo de contato dos microrganismos com o efluente bruto, o que ajudou na remoção dos ST.

A Figura 5.2 apresenta a distribuição temporal de eficiência para DQO.

Figura 5.2 - Gráfico de distribuição temporal de eficiência para a DQO



A eficiência dos filtros na remoção de DQO também foi maior nos WCV – 20 cm (WCV 1 - 20 cm = 93%; WCV 2 - 20 cm = 93%; WCV 3 - 20 cm = 91%). Os WCV - 10 cm atingiram eficiências menores (WCV 1 - 10 cm = 82%; WCV 2 - 10 cm = 85%; WCV 3 - 10 cm = 80%). Os WCV que atingiram as maiores eficiências foram o WCV 1 – 20 cm (93%) e o WCV 2 – 20 cm (93%). Eles trabalharam com os carregamentos de 15 e 28 Kg de ST/m².ano, respectivamente. Ao comparar com Magri et al. (2016), o WCV – 20 cm (1 e 2) obtiveram eficiências mais altas para este parâmetro (DQO), pois o trabalho dos autores atingiu 90% de eficiência.

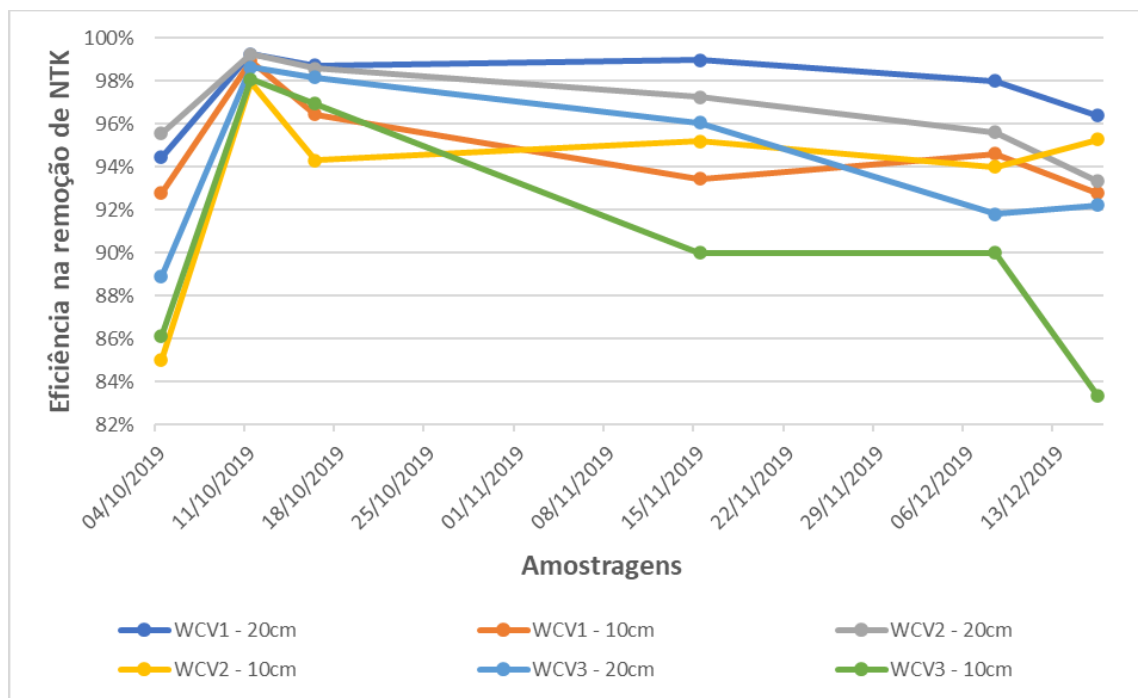
Essa maior remoção justifica-se também pelo maior acúmulo de lodo que serve como alimento para os microrganismos. Desse modo, os microrganismos tiveram

maior reserva de nutrientes e maior tempo de contato com o lodo. Assim, puderam degradá-lo com mais eficiência e levar a concentração de DQO do efluente final a valores menores.

Para remoção desse parâmetro, é recomendada, para as condições climáticas locais, o projeto e operação de unidades, em escala piloto e real, com base nas condições trabalhadas no WCV 3 – 20 cm deste estudo, pois essa unidade obteve uma eficiência de 91%, valor muito próximo à eficiência dos outros dois WCV – 20 cm (93%). Assim, como o WCV 3 – 20 cm recebeu o maior carregamento de ST (42 Kg de ST/m².ano), situado na faixa recomendada pela literatura (Quadro 3.2), ele é o mais viável economicamente, pois demanda menor quantidade de área e também é eficiente.

A Figura 5.3 apresenta a distribuição temporal de eficiência para NTK.

Figura 5.3 - Gráfico de distribuição temporal de eficiência para o NTK



Para a remoção de NTK, os WCV – 20 cm também foram mais eficientes (WCV 1 - 20 cm = 98%; WCV 2 - 20 cm = 97%; WCV 3 - 20 cm = 94%). Para esse parâmetro, os WCV – 10 cm obtiveram eficiências menores (WCV 1 - 10 cm = 95%; WCV 2 - 10 cm = 94%; WCV 3 - 10 cm = 91%). A maior eficiência foi obtida pelo WCV 1 – 20 cm (98%), que operou com uma taxa de aplicação de 15 Kg de ST/m². Se comparado

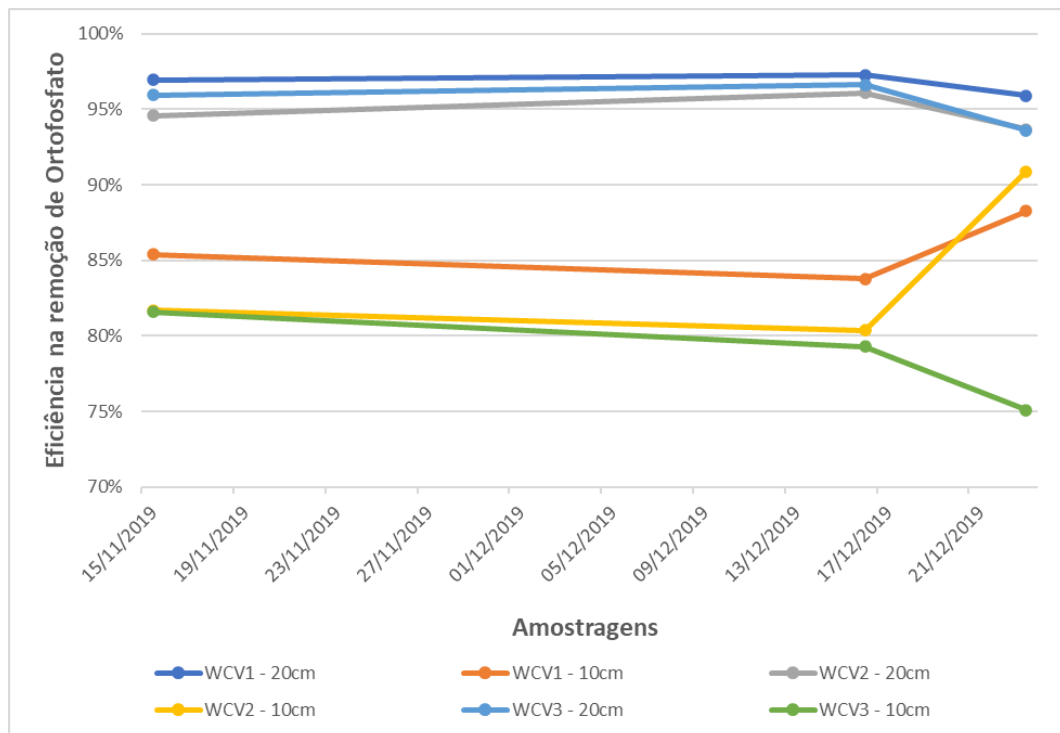
com Suntti (2016), o WCV 1 – 20 cm obteve eficiência mais alta para este parâmetro (NTK), pois o trabalho da autora atingiu 91% de eficiência.

Desse modo, assim como para os outros parâmetros, os WCV – 20 cm obtiveram maior eficiência, o que justifica-se pelo fundo saturado desses *wetlands*, que permite maior atividade microbiana. No caso do NTK, para esse nutriente ser removido, o lodo deve passar pelos processos de nitrificação e desnitrificação. Esses processos dependem de um ambiente aeróbio, além de condições anóxicas. Esse ambiente e essas condições são fornecidos pelos WCV (Von Sperling, 2001).

Sobre qual WCV é melhor adotar, recomenda-se as condições operacionais do WCV 3 – 20 cm. Para NTK, todos as unidades obtiveram eficiências próximas a 100%, sendo que o WCV 3 – 20 cm obteve 94%. Portanto, como esse WCV recebeu a maior taxa de aplicação de ST (42 Kg de ST/m².ano), necessita menor área para realizar o tratamento.

A Figura 5.4 apresenta a distribuição temporal de eficiência para P-PO₄³⁻.

Figura 5.4 - Gráfico de distribuição temporal de eficiência para o P-PO₄³⁻



Os WCV – 20 cm obtiveram maiores eficiências na remoção de ortofosfato (WCV 1 - 20 cm = 97%; WCV 2 - 20 cm = 95%; WCV 3 - 20 cm = 95%). Os WCV - 10

cm atingiram eficiências menores (WCV 1 - 10 cm = 86%; WCV 2 - 10 cm = 84%; WCV 3 - 10 cm = 79%). A maior eficiência foi obtida pelo WCV 1 – 20 cm (97%), que operou com uma taxa de aplicação de 15 Kg de ST/m². Comparando com Magri et al. (2016), o WCV 1 – 20 cm obteve eficiência um pouco mais alta para este parâmetro (DQO), pois o trabalho dos autores atingiu 95% de eficiência.

Dessa forma, recomenda-se para estudos futuros, em escala piloto ou real, as condições operacionais do WCV 3 – 20 cm, que obteve eficiência de 95%. Destaca-se que os outros dois WCV – 20 também obtiveram eficiências próximas a 100%. No entanto, o WCV 3 – 20 cm, além de ter atingido uma elevada eficiência, também é o mais viável economicamente, pois demanda menor área para realizar o tratamento.

Essa maior eficiência dos WCV – 20 cm também é por causa da maior saturação. Dessa forma, os microrganismos possuem maior reserva de nutrientes e conseguem maiores eficiências na remoção dos poluentes. Além disso, o maior tempo de detenção hidráulica permite maior tempo de contato dos microrganismos com o lodo, o que auxilia na remoção. As plantas também utilizam o ortofosfato para seu crescimento, contribuindo para aumentar a eficiência dos WCV (PELISSARI et al. 2019).

6 CONCLUSÕES

Inicialmente, ao considerar os objetivos deste trabalho, que era avaliar o desempenho de *wetlands* construídos verticais – em diferentes condições operacionais - para o tratamento de lodo proveniente de tanque séptico, por meio de análises para os parâmetros propostos (ST, DQO, NTK e ortofosfato), pode-se concluir que os WCV obtiveram desempenho satisfatório e que as diferentes condições operacionais foram fundamentais para encontrar maiores eficiências na remoção dos poluentes do lodo. Além disso, os resultados poderão ser usados como referência para outras pesquisas, em escala piloto ou real, com vistas à avaliação do desempenho ao longo do tempo em condições operacionais e climáticas semelhantes as deste trabalho. Com isso, será possível adaptar parâmetros de projeto e contribuir para a universalização do saneamento do país.

Posteriormente, um aspecto bem relevante, verificado ainda no início do experimento, é que as unidades experimentais plantadas com *Canna sp.* devem ser instaladas em local aberto, caso contrário, as plantas não se desenvolverão por falta de luz solar e não poderão contribuir na remoção dos poluentes do lodo. Desse modo, após a verificação de que as macrófitas não estavam se desenvolvendo em local fechado, elas foram instaladas em local aberto – sujeitas a variações climáticas, onde atingiram crescimento satisfatório.

Além disso, é fundamental falar da diferença entre os WCV - 20 cm e os WCV - 10 cm. Pôde-se observar que os WCV com o fundo mais saturado (20 cm) obtiveram eficiências mais elevadas, pois houve maior tempo de contato do lodo com os microrganismos.

Ainda, é preciso explicar que os WCV – 20 cm (1, 2 e 3), além de obterem elevado desempenho, tiveram eficiências muito próximas. Então, o maior carregamento de ST estudado (42 kg ST/m².ano) é o recomendado para pesquisas futuras, a fim de reduzir a demanda de área e viabilizar economicamente o tratamento de lodo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABES. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Situação do Saneamento Básico no Brasil: Uma Análise com Base na PNAD 2016. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7229**. Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. ABNT, Rio de Janeiro, 1993, 15 p.

ANDRADE NETO, C. O. **Sistemas para tratamento de esgotos sanitários**: experiência brasileira. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997. 301p.

ANDREOLI, C. V. et al. Wastewater sludge management: a Brazilian approach. In: **Wastewater Biosolids Sustainability**, 2007, Moncton, Moving Forward – Wastewater Biosolids Sustainability, 2007. p. 117-131.

APHA et. Al. **Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater**, 22nd Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC. 2012

CARRILHO, Samara Monayna Alves Vasconcelos Carrilho; CARVALHO, Eraldo Henriques Carvalho. **Avaliação da disposição de lodos de fossa e tanque sépticos em lagoas de estabilização que tratam lixiviados de aterro sanitário**, 2016.

COOPER, P.; WILLOUGHBY, N.; COOPER, D. The use of reed-beds for sludge drying. In: **CIWEM/AquaEnviro Conference on Biossolids and Organic Residuals**, 7th. Wakefield, 2004. p. 85-89.

DECESARO, S. T. **Nitrificação e remoção de matéria orgânica carbonácea e sólidos de efluente doméstico em wetland construído de fluxo vertical**. 2016, 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2016.

GIRARDI, M. H. **The microbiology of anaerobic digesters**. New York: Wiley Interscience, 2003, 177p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas de Saneamento 2011**. Rio de Janeiro. 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro. 2008.

JORDÃO, E. P.; ALÉM SOBRINHO, P. Lodo de fossas sépticas: uma análise crítica. In: ANDREOLI, C. V. (coord.) Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p.375-383.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. **Treatment Wetlands**. Taylor & Francis Group, LLC. 2^o ed, 2009, 336p.

KLINGEL, F. **Nam Dinh urban development project – septage management study**. Nam Dinh City: EAWAG/SANDEC, 2001. 78p.

KOOTTATEP, T.; POLPRASERT, C.; OANH, N. T. K. Preliminary guidelines for design and operation of constructed wetlands treating septage. In: **International Seminar on Constructed wetlands: a promising technology for septage management and treatment**. Thailand, EAWAG/SANDEC, 1999a. 4 p.

KOOTTATEP, T.; POLPRASERT, C.; OANH, N. T. K. Results of the 2-year observations and lessons learnt from operating experience of the AIT constructed wetlands. In: **International Seminar on Constructed wetlands: a promising technology for septage management and treatment**. Thailand, EAWAG/SANDEC, 1999b. 9 p.

MAGRI et al. **Constructed wetlands for sludge dewatering with high solids loading rate and effluent recirculation: Characteristics of effluent produced and**

accumulated sludge. Department of Sanitary and Environmental Engineering, Federal University of Santa Catarina, 2016.

NIELSEN, S. Sludge drying reed beds. **Wat. Sci. Tech.** Vol. 48, nº 5, p. 101-109, 2003.

NIELSEN, S. Sludge reed beds facilities – operation and problems. **Wat. Sci. Tech.** Vol. 51, nº 9, p. 99-107, 2005.

NIELSEN, S.; WILLOUGHBY, N. Sludge treatment and drying reed bed systems in Denmark. **Water and Environmental Journal.** Vol. 19, nº 4, p. 296-295, 2007.

PELISSARI, C. et al. Incorporação de nitrogênio e fósforo no tecido foliar da macrófita *Typha domingensis* Pers. durante o tratamento de efluente da bovinocultura leiteira em wetlands construídos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental** [online]. 2019, v. 24, n. 03 [Acessado 23 Julho 2021] , pp. 585-590. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522019109345>>. Epub 10 Jun 2019.

PEREIRA, J. A. R. et al. Gestão de lodo de fossa/tanque séptico. In: ANDREOLI, C. V. (coord.) **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final.** Rio de Janeiro: ABES, 2009. p. 283-326.

ROCHA, C.; SANT'ANNA, F. S. P. Regulamentação para despejos de caminhões limpa-fossas na ETE Jarivatuba, Joinville, SC. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23. **Anais...** ABES, Campo Grande, 2005.

STEFANAKIS, A.; AKRATOS, C. S.; TSIHRINTZIS, V. A. Vertical Flow Constructed Wetland: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. Elsevier Inc. 2014. 363p.

SUNTTI, C. **Desaguamento de lodo de tanque séptico em filtros plantados com macrófitas.** 2010. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

UGGETTI, E. et al. Sludge dewatering and mineralization in two full-scale drying reed beds in Catalonia, Spain. **Bioresourse Technology.** Vol. 100, p. 3882-3890, 2009.

UGGETTI, E.; FERRER, I.; LLORENS, E.; GARCÍA, J. Sludge treatment wetlands: A review on the state of art. **Bioresource Technology**. Doi:10.1016. 2009. 8p.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias)**. Vol. 1. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 452p. 2005.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. p.17-67.

YUBO, C. et al. Performance of wastewater sludge ecological stabilization. **Journal of Environmental Sciences**, Changchun, nº 20, p. 385-389, 2008.

8 APÊNDICES

Apêndice 1 - Dados Brutos das Análises de Lodo Bruto e Efluente Tratado

Data	Concentrações (mg/L)				T (°C)	pH
	ST	DQO	NTK	P-PO ₄ ³⁻		
Lodo Bruto						
04/10/2019	2113	3396,11	126	X		
11/10/2019	5260		910		25,90	7
16/10/2019	11987	X	980		23,60	7,80
15/11/2019	2913	5693,69	406	85,04		7,33
08/12/2019	9460		350		25,80	7
16/12/2019	5400	7370,74	252	109,37	23,90	6,30
23/12/2019	10713	8028,77		102		
WCV 1 – 20 cm						
04/10/2019	650	410,35	7	X		
11/10/2019	1020		7		26,80	6,80
16/10/2019	1193	X	12,60		21,20	6,80
15/11/2019	X	408,80	4,20	2,61		6,51
08/12/2019	1630		7		24,20	6,60
16/12/2019	1210	355,51	9,10	3	23,30	7,34
23/12/2019	2180	218,42		4,20		
WCV 1 – 10 cm						
04/10/2019	1480	849,03	9,1	X		
11/10/2019	1260		9,8		27,30	7,30
16/10/2019	1553	X	35		21,50	7,20
15/11/2019	X	963,65	26,60	12,42		7,03
08/12/2019	2950		18,90		23,20	6,70
16/12/2019	2100	1216,42	18,20	17,73	23,60	7,11
23/12/2019	2780	1186,26		11,99		
WCV 2 – 20 cm						
04/10/2019	900	339,06	5,60	X		
11/10/2019	1220		7		26,90	6,70
16/10/2019	1387	X	14		21,50	6,80
15/11/2019	X	372,37	11,20	4,61		6,24
08/12/2019	2070		15,40		22,80	6,70
16/12/2019	1320	437,66	16,80	4,30	23,50	7,59
23/12/2019	2440	404,86		6,45		
WCV 2 – 10 cm						
04/10/2019	950	569,36	18,9	X		
11/10/2019	1520		18,9		27,3	7
16/10/2019	1840	X	56		21,8	7
15/11/2019	X	639,9	19,6	15,57		6,58

Data	Concentrações (mg/L)				T (°C)	pH
	ST	DQO	NTK	P-PO ₄ ³⁻		
08/12/2019	2560		21		22,70	6,70
16/12/2019	1790	1194,49	11,90	21,47	23,50	7,29
23/12/2019	2690	1268,52		9,31		

WCV 3 – 20 cm

04/10/2019	920	432,28	14	X		
11/10/2019	1600		12,60		27,40	6,60
16/10/2019	1013	X	18,20		21,50	6,70
15/11/2019	X	508,25	16,10	3,47		6,82
08/12/2019	1750		28,70		22,30	6,70
16/12/2019	1250	563,89	19,60	3,69	23,50	7,42
23/12/2019	2240	520,08		6,53		

WCV 3 – 10 cm

04/10/2019	950	635,17	17,50	X		
11/10/2019	1710		17,50		27,30	7
16/10/2019	1987	X	30,10		21,30	7
15/11/2019	X	1007,31	40,60	15,66		6,63
08/12/2019	2550		35		22,30	6,60
16/12/2019	2070	1923,80	42	22,66	23,40	6,53
23/12/2019	2710	1490,60		25,40		

OBS: "x" corresponde a análises incompletas ou não aproveitáveis.