

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PESQUISA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE – PPGEMA

ÉDIO DAMÁSIO DA SILVA JÚNIOR

**TRATAMENTO DO LODO DE RESÍDUOS DE FOSSAS E TANQUES
SÉPTICOS EM UM SISTEMA DE ALAGADO CONSTRUÍDO**

Goiânia / 2013

ÉDIO DAMÁSIO DA SILVA JÚNIOR

**TRATAMENTO DO LODO DE RESÍDUOS DE FOSSAS E TANQUES
SÉPTICOS EM UM SISTEMA DE ALAGADO CONSTRUÍDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos à obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Rogério de Araújo Almeida

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)
(GPT/BC/UFG)**

S587t Silva Júnior, Édio Damásio.
Tratamento do lodo de resíduos de fossas e tanques sépticos em um sistema de alagado construído [manuscrito] / Édio Damásio da Silva Júnior. - 2013.
xv, 75 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Rogério de Araújo Almeida.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2013.
Bibliografia.
Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas, quadros e tabelas.

1. Água residuais. 2. Fossas e tanques – Resíduos. 3. Lodo de esgoto – Higienização. I. Título.

CDU: 628.38

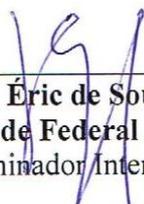
ÉDIO DAMÁSIO DA SILVA JUNIOR

**TRATAMENTO DO LODO DE RESÍDUOS DE FOSSAS E TANQUES SÉPTICOS EM
UM SISTEMA DE ALAGADO CONSTRUÍDO**

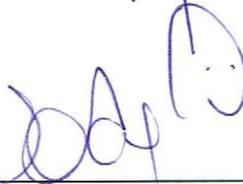
Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, aprovada em 13 de novembro de 2013 pela Banca Examinadora:



Prof. Dr. Rogério de Araújo Almeida
Universidade Federal de Goiás
Presidente da Banca



Prof. Dr. Éric de Souza Gil
Universidade Federal de Goiás
Examinador Interno



Profa. Dra. Elizabeth Agostini
Universidad Nacional de Río Cuarto – Argentina
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Plenos agradecimentos à Ordem Suprema mantenedora do universo, pela oportunidade de vida.

Múltiplos obrigados aos meus amados entes, que sempre me deram força e apoio nas minhas decisões e lutas.

Meus sinceros agradecimentos também às pessoas e entidades que demasiadamente contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho: Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Saneamento de Goiás S. A. (SANEAGO), Prof. Rogério de Araújo Almeida, Prof. Eraldo Henriques de Carvalho, Ábio Rodvalho da Silva, Elisa Rodrigues Siqueira, Octaviano Magalhães Neto, Fábio Julian, técnicos laboratoriais da SANEAGO e da Universidade Federal de Goiás (Jorge, Guilherme e Nayara), além de diversos outros que me perdoem por não fazer referência.

A todos, meus sinceros sentimentos de felicidade e gratidão.

RESUMO

SILVA JÚNIOR, E. D. **Tratamento do lodo de resíduos de fossas e tanques sépticos em um sistema de alagado construído**. 2013. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013¹.

A utilização de sistemas individuais de tratamento e disposição de esgoto (SITDE) constitui-se em opção à carência de saneamento básico em diversas regiões brasileiras, principalmente em pequenos núcleos populacionais. Todavia, os resíduos esgotados nestes sistemas representam novo problema sanitário, uma vez que contém elevados teores de organismos patogênicos e de carga orgânica. Estes resíduos, denominados de resíduos de fossas e tanques sépticos (RFTS), devem ser tratados antes de sua disposição no meio ambiente. Tecnologias simples e de baixos custos, como os sistemas de alagados construídos (SAC's), devem ser desenvolvidas e pesquisadas visando sua implantação em pequenos núcleos populacionais. Este trabalho objetivou avaliar o tratamento, mais especificamente a higienização e estabilização, do lodo acumulado em um SAC projetado para tratamento de RFTS. Foram construídos dois tanques, escavados no solo e preenchidos com camadas sobrepostas de brita e areia para aplicação e tratamento dos RFTS. Um tanque foi cultivado com a espécie vegetal Capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) e o outro serviu de testemunha. Os RFTS foram aplicados através do esgotamento de caminhões limpa-fossa. O sistema comportou-se em fluxo subsuperficial vertical descendente, controlado por um sistema de extravasão de líquidos. Foram realizadas análises físico-químicas e microbiológicas do resíduo bruto e do lodo em tratamento de ambos os tanques. Caracterizou-se o potencial nutricional do RFTS por meio da determinação das concentrações de fósforo total, nitrogênio total, orgânico e amoniacal, nitrito e nitrato. A carga de patógenos foi obtida por meio da contagem de coliformes totais, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. e ovos viáveis de helmintos. Também foram caracterizados os atributos pH, umidade, sólidos totais, fixos e voláteis. Do lodo acumulado na superfície dos leitos de tratamento avaliaram-se a carga patogêna, o teor de sólidos e a umidade. Os resultados foram comparados com o estabelecido pela resolução nº 375/2006, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), para verificar sua potencialidade de uso agrícola. A caracterização do resíduo bruto apresentou dados similares à literatura, com elevadas concentrações de patógenos e nutrientes, além da alta dispersão de resultados. Com as disposições do RFTS, a camada de lodo aumentou em ambos os sistemas, com valores superiores para o SAC (cerca de 1,1 cm ao mês), em virtude de sua maior capacidade de retenção de umidade. Durante a fase de aplicação dos resíduos, o lodo de ambos os tanques permaneceu com altos valores de organismos patogênicos. Ao cessar as aplicações, houve considerável redução destes valores, sugerindo que para melhor tratamento do lodo deve-se haver um período de “descanso”, sem aplicações. Observou-se que após um período de dois meses de “descanso”, o lodo de ambos os tanques foi enquadrado na classe A, com possibilidade de uso na agricultura, conforme normatiza o CONAMA. De forma geral, o tanque sem plantas apresentou maior rapidez no processo de higienização do lodo do que no SAC, principalmente em função da exposição solar direta. Entretanto, no que tange ao processo de estabilização, o SAC foi superior ao tanque controle.

Palavras-chave: Fitoremediação; Higienização; Reuso agrícola.

¹ Orientador: Prof. Dr. Rogério de Araújo Almeida.

ABSTRACT

SILVA JÚNIOR, E. D. **Septic tanks and cesspools residues sludge treatment at a constructed wetlands system.** 2013. 75 p. Dissertation (Masters of Environmental Engineering) – Civil Engineering College, Post-Graduation *Stricto Sensu* Program in Environmental Engineering – Federal University of Goiás, Goiânia, Brazil, 2013².

The use of individual systems for treatment and disposal of sewage (ISTDS) comes as an option to the lack of sanitation in many Brazilian regions, mainly in small settlements. However, the wastes generated in these systems represent another health problem, since it contains high levels of pathogens and organic load. These wastes, termed septic tanks and cesspools residues (STCR) must be treated before their disposal to the environment. Simple and low cost technologies, like the constructed wetlands systems (CW), should be developed and evaluated aiming its implementation in small population centers. This study aimed to evaluate the treatment, more specifically the cleaning and stabilization, of the sludge accumulated in a CW designed to treat STCR. Two tanks were constructed, dug into the ground and filled with overlapping layers of gravel and sand for application and treatment of the STCR. One of them was grown by the vegetal specie Vetiver Grass (*Chrysopogon zizanioides*) and the other one was used as a control treatment. The STCR were applied to the system by the exhaustion of clean-pit trucks. The system behaved in vertical downward subsurface flow, controlled by a fluid spilling system. Physical-chemical and microbiological analyses of the crude residue and sludge in treatment in both tanks were made. The STCR nutritional potential was characterized through the determination of total phosphorus, total, organic and ammonia nitrogen, nitrite and nitrate. Their pathogen load was characterized by counting total coliforms, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. and helminths viable eggs. In addition, were characterized the attributes pH, moisture, total, volatile and fixed solids. From the sludge accumulated on the surface of treatment beds they were evaluated its pathogen load, solids content and moisture. The results were compared with the established pursuant to resolution n° 375/2006, of the Brazilian National Council for the Environment (CONAMA), to verify the possibility of the sludge use in agriculture. The crude residue characterization results, showed to be similar to those cited by the literature, with high concentrations of pathogens and nutrients and also, high dispersion of values. With STCR disposals, the sludge layer increased in both systems, with higher values for the CW (about 1.1 cm per month), because of their greater capacity to retain moisture. During the disposal phase, both tanks sludge remained with high values of pathogenic organisms. At the end of the applications, there has been considerable reduction of these values, suggesting that for a better sludge treatment should be a period of "rest" without applications. It was observed that after two months of "rest", the sludge from both tanks was framed in A Class, with potential use in agriculture, as standardizes the resolution n° 375/2006 of CONAMA. In general, the tank without plants showed greater speed in the process of cleaning the sludge than the CW, mainly due to the direct sunlight exposure. However, with respect to the stabilization process, the CW was better than the control tank.

Keywords: Phytoremediation; Sanitation; Agricultural reuse.

² Tutor: Prof. Dr. Rogério de Araújo Almeida.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Evolução percentual de algumas variáveis do esgotamento sanitário no Brasil	18
Figura 2 Tanque séptico de câmara única	20
Figura 3 Tanque séptico de câmara dupla.....	20
Figura 4 Sumidouro implantado com paredes revestidas por tijolos.....	21
Figura 5 Esquema de uma fossa recebendo esgoto sanitário de uma residência.....	21
Figura 6 Esquema de um Sistema de Alagados Construídos (SAC) com plantas flutuantes livres.....	29
Figura 7 Sistema de Alagados Construídos (SAC), com plantas submersas..	30
Figura 8 Esquema de um Sistema de Alagados Construídos (SAC) com plantas aquáticas emergentes.....	30
Figura 9 Esquema de um Sistema de Alagado Construído de fluxo subsuperficial horizontal.....	31
Figura 10 Esquema de um Sistema de Alagado Construído de fluxo subsuperficial vertical descendente.....	31
Figura 11 Vista geral da estação experimental de tratamento de resíduos de fossas e tanques sépticos do tipo alagados construídos.....	40
Figura 12 Planta representativa do sistema de alagados construídos implantado (sem escala).....	40
Figura 13 Corte transversal representativo da estação experimental implantada.....	41
Figura 14 Imagem parcial do sistema de impermeabilização dos tanques e do sistema de drenagem de gases e lixiviado.	41
Figura 15 Preenchimento do tanque com camadas superpostas de substrato..	42
Figura 16 Vista geral do sistema após o preenchimento com substrato.	43
Figura 17 Barreira de sacos com terra destinados à contenção das águas de escoamento superficial do terreno externo.	43
Figura 18 Imagem geral do sistema de distribuição dos resíduos em ambos os tanques	44
Figura 19 Imagem da caixa receptora dos RFTS e da grade para retenção dos sólidos grosseiros.....	45
Figura 20 Corte longitudinal representativo do sistema hidráulico da estação experimental de tratamento de resíduos esgotados de fossas e tanques sépticos.	46

Figura 21 Dispositivos de controle de nível interno de líquidos e de coleta de amostras do efluente tratado, hidrômetro de medição do volume drenado e registro de saída de um dos tanques de tratamento.	46
Figura 22 Vista do tanque de tratamento com as mudas de Capim Vetiver plantadas e já em fase de brotação.....	47
Figura 23 Hidrômetros implantados nas descargas de fundo dos tanques para aferir os volumes drenados.....	48
Figura 24 Procedimento de amostragem do resíduo no ato da sua disposição no SAC.	49
Figura 25 Procedimento de descarga do RFTS na caixa de recepção do sistema experimental de tratamento.	51
Figura 26 Distribuição igualitária dos resíduos nos tanques de tratamento.....	51
Figura 27 Medição da espessura da camada de lodo acumulada na superfície do SAC..	53
Figura 28 Diagrama em caixa da concentração de fósforo total.	56
Figura 29 Diagrama em caixa da concentração de nitrogênio total.....	56
Figura 30 Diagrama em caixa da concentração de nitrogênio orgânico.....	56
Figura 31 Diagrama em caixa da concentração de nitrogênio amoniacal.....	56
Figura 32 Diagrama em caixa da concentração de nitrito.....	56
Figura 33 Diagrama em caixa da concentração de nitrato.	56
Figura 34 Diagrama em caixa da concentração de sólidos totais.	57
Figura 35 Diagrama em caixa da concentração de sólidos fixos.....	57
Figura 36 Diagrama em caixa da concentração de sólidos voláteis.	57
Figura 37 Diagrama em caixa da concentração de coliformes totais.	57
Figura 38 Diagrama em caixa da concentração de <i>Escherichia coli</i>	57
Figura 39 Diagrama em caixa da concentração de ovos viáveis de helmintos.	57
Figura 40 Gráfico representativo da taxa de aplicação de sólidos dos RFTS no sistema experimental de tratamento.	58
Figura 41 Acúmulo de lodo no SAC (esquerda) e no tanque controle após quatro semanas de aplicações do RFTS.....	59
Figura 42 Variação da altura de lodo superficial acumulado ao longo do tempo.	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Níveis de atendimento de coleta e tratamento de esgoto urbano nos municípios brasileiros até o ano de 2009..	18
Quadro 2 Relação da quantidade de municípios brasileiros e formas de destinação do lodo do sistema de tratamento de esgoto municipal.	24
Quadro 3 Custo da fitorremediação, utilizando raízes de gramíneas, em comparação com outras tecnologias de remediação de ambientes contaminados..	26
Quadro 4 Exemplo de espécies de plantas e os respectivos metais que elas podem remediar.	27
Quadro 5 Valores médios de patógenos presentes nos Resíduos de Fossas e Tanques Sépticos esgotados por caminhões “limpa-fossa”	35
Quadro 6 Classes de lodo de esgoto ou produto derivado segundo agentes patogênicos..	37
Quadro 7 Parâmetros analisados, número de amostras e métodos analíticos utilizados na caracterização dos Resíduos de Fossas e Tanques Sépticos submetidos a tratamento no sistema experimental avaliado.	49
Quadro 8 Parâmetros analisados, número de amostras e métodos analíticos empregados na caracterização do lodo.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Caracterização do resíduo bruto afluente ao sistema experimental de tratamento...	55
Tabela 2 Caracterização do lodo acumulado no tanque controle	62
Tabela 3 Caracterização do lodo acumulado no tanque plantado.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

cm: Centímetro (distância)

FINEP: Financiadora de Estudos e Projetos

g: Grama (massa)

kg: Quilograma (massa)

m: Metro (distância)

mm: Milímetro (distância)

mg: Miligrama (massa)

m²: Metros quadrados (área)

m³: Metros cúbicos (volume)

L: Litro (volume)

MCIDADES: Ministério das Cidades

MCT: Ministério de Ciências e Tecnologias

NMP: Número mais provável

PLANSAB: Plano Nacional de Saneamento Básico

PNSB: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico

RFTS: Resíduos de fossas e tanques sépticos

SAC: Sistema de alagado construído

SITDE: Sistema individual de tratamento e disposição de esgoto

SF: Sólidos fixos

ST: Sólidos totais

SV: Sólidos voláteis

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1 ESGOTOS DOMÉSTICOS.....	17
3.2 PANORAMA DO ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO BRASIL	17
3.3 SISTEMAS INDIVIDUAIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO	19
3.4 RESÍDUOS GERADOS PELOS SITDE	22
3.5 TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DE LODO GERADO EM SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO	23
3.6 FITORREMEDIAÇÃO E O CAPIM VETIVER	25
3.7 WETLANDS CONSTRUÍDAS OU ALAGADOS CONSTRUÍDOS	29
3.8 USO AGRÍCOLA DE LODO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO	34
4 MATERIAL E MÉTODOS	39
4.1 LOCAL DE ESTUDO.....	39
4.2 SISTEMA DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS (SAC).....	39
4.2.1 TANQUES, SISTEMA DE DRENAGEM E SUBSTRATOS	40
4.2.2 SISTEMA DE RECEPÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS RFTS	43
4.2.3 SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL DOS RESÍDUOS.....	45
4.2.4 PLANTIO DA ESPÉCIE VEGETAL.....	46
4.2.5 BALANÇO HÍDRICO NOS SISTEMAS	47
4.3 AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DOS RFTS	48
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	50
4.5 DISPOSIÇÃO DOS RFTS NOS TANQUES DE TRATAMENTO	50
4.6 AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DO LODO GERADO.....	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
6 CONCLUSÕES	67
7 RECOMENDAÇÕES	68
8 REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

Vários efeitos deletérios ao meio ambiente e à saúde humana em virtude da exposição a elementos tóxicos e organismos patogênicos decorrem do gerenciamento inadequado de resíduos sólidos e líquidos gerados pelas atividades humanas.

Dentre as diversas classificações de resíduos, aqueles oriundos do esgotamento de fossas e tanques sépticos, popularmente conhecidos como “lodo de fossa”, merecem destaque especial, uma vez que podem conter substâncias tóxicas e organismos patogênicos (BETTIOL e CAMARGO, 2006).

Estes resíduos são gerados pela disposição e acúmulo da fração sólida de esgoto sanitário em sistemas individuais de tratamento e disposição de esgoto (SITDE), soluções alternativas para atender ao déficit de saneamento no País, uma vez que grande parte da população brasileira não é atendida por rede coletora de esgoto sanitário (ANDREOLI e POMPEO, 2009).

O termo “lodo”, bastante utilizado, não é o mais adequado para se referenciar estes resíduos, uma vez que não possuem características típicas de lodo convencional. Por outro lado, também não se assemelham ao esgoto sanitário (INGUNZA et al., 2009). Assim, não há nomenclatura específica e normatizada, recebendo denominações como Lodos Fecais (KOOTTATEP et al., 2002), Resíduos Esgotados de Sistemas de Tratamento Individuais de Esgotos (RATIS, 2009), Resíduos Esgotados de Sistemas Individuais de Disposição de Esgoto, entre outras. Neste trabalho, será utilizada a denominação de Resíduos de Fossas e Tanques Sépticos (RFTS).

De forma geral, o correto gerenciamento dos RFTS se faz de fundamental importância e urgência, visando, sobretudo a preservação da qualidade do meio ambiente e da saúde da população. Tal necessidade foi evidenciada pela chamada pública – Saneamento ambiental e habitação, edital nº7/2009 do Ministério de Ciências e Tecnologia (MCT), Ministério das Cidades (MCIDADES) e Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), que em seu tema 1.6 buscava o “Aperfeiçoamento e desenvolvimento de processos de tratamento do lodo de fossas sépticas, isoladamente ou em conjunto com esgoto sanitário...”, visando, sobretudo “... promover o desenvolvimento de soluções inovadoras aplicáveis ao saneamento ambiental e à habitação, que sejam de fácil aplicabilidade, baixo custo de implantação, operação e manutenção.” (BRASIL, 2009).

Neste contexto, faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias de baixo custo e que forneçam adequado tratamento e destinação final para estes resíduos, sobretudo para municípios de pequeno e médio porte.

Sistemas alternativos de tratamento de RFTS têm sido pesquisados, com destaque para os trabalhos de Liénard e Payrastre (1996), Koottatep et al. (2002) e Suntti, Magri e Philippi (2011), que consistem na utilização de sistemas de alagados construídos (SAC) no tratamento deste tipo de resíduo.

Os SAC's utilizam plantas no tratamento de águas residuárias de fontes diversas. Representa uma tecnologia emergente que está se revelando como alternativa eficiente e de baixo custo, em comparação aos sistemas convencionais. Esses sistemas podem ser implantados no local onde o esgoto é produzido, podem ser operados por pessoas de baixa escolaridade, demandam pouca energia e são mais flexíveis e menos susceptíveis às variações nas taxas de aplicação (BRIX, 1994; SOLANO, SORIANO e CIRIA, 2004).

Em um leito de SAC, destaca-se a boa eficiência no tratamento da fração líquida lixiviada de RFTS. Entretanto, existem poucas pesquisas envolvendo o tratamento e a destinação da fração sólida acumulada na superfície dos leitos de tratamento (KOOTTATEP et al., 2004a). Esta fração sólida, sim, apresenta características similares às do lodo oriundo de sistemas convencionais de tratamento de esgoto e água.

O uso agrícola do lodo de sistemas de tratamento de esgotos vem apresentando-se como promissora e conveniente alternativa para a destinação destes resíduos, principalmente em relação ao potencial fertilizante do material e de autodepuração no solo. No entanto, a presença de metais pesados e de organismos patogênicos nestes resíduos deve ser estudada, para evitar a contaminação do ambiente.

Mesmo que a prática de utilização do lodo de RFTS na agricultura seja uma alternativa econômica e operacional para a destinação deste resíduo, são necessárias medidas que minimizem o risco de contaminação ao meio ambiente e à saúde pública, tais como a estabilização do resíduo, redução de odores desagradáveis e da atratividade de vetores, além da redução da quantidade de patógenos.

Mediante a necessidade de se oferecer destinação ambientalmente correta para a fração sólida dos RFTS e sabendo que estes são fontes de nutrientes, são necessários estudos que contribuam para o desenvolvimento de alternativas para seu tratamento e que se estabeleçam critérios para o seu uso em atividades agrícolas sem comprometimento da qualidade do meio ambiente e da saúde da população.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência do sistema de alagado construído, cultivado com Capim Vetiver (*Vetiveria zizanioides* L. Nash, reclassificado como *Chrysopogon zizanioides* Roberty L.), no tratamento do lodo de resíduos de fossas e tanques sépticos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Especificamente, o presente trabalho objetivou:

- Caracterizar os RFTS segundo parâmetros microbiológicos e físico-químicos, e, sobretudo, seu potencial nutricional;
- Avaliar o processo de higienização (redução ou eliminação de patógenos) do lodo de RFTS pelo sistema de alagado construído;
- Avaliar o processo de estabilização do lodo de RFTS pelo SAC;
- Verificar a possibilidade de uso agrícola do lodo tratado no sistema proposto;
- Sugerir parâmetros de projeto para dimensionamento do SAC segundo o acúmulo de lodo no sistema.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 ESGOTOS DOMÉSTICOS

Conceitualmente, define-se esgoto doméstico como sendo:

Águas residuárias que provêm principalmente de residências, estabelecimentos comerciais, instituições ou quaisquer edificações que dispõem de instalações de banheiros, lavanderias e cozinhas. Compõem-se essencialmente da água de banho, excretas, papel higiênico, restos de comida, sabão, detergentes e águas de lavagem (BRASIL, 2004, p.154).

Segundo o aspecto qualitativo, o esgoto doméstico possui características físicas, químicas e biológicas que devem ser consideradas antes da sua disposição no meio ambiente (JORDÃO e PESSOA, 2011). Sua destinação final nos corpos hídricos ou no solo, sem tratamento prévio e adequado, implica em consequências negativas para a qualidade de vida das pessoas e do meio ambiente.

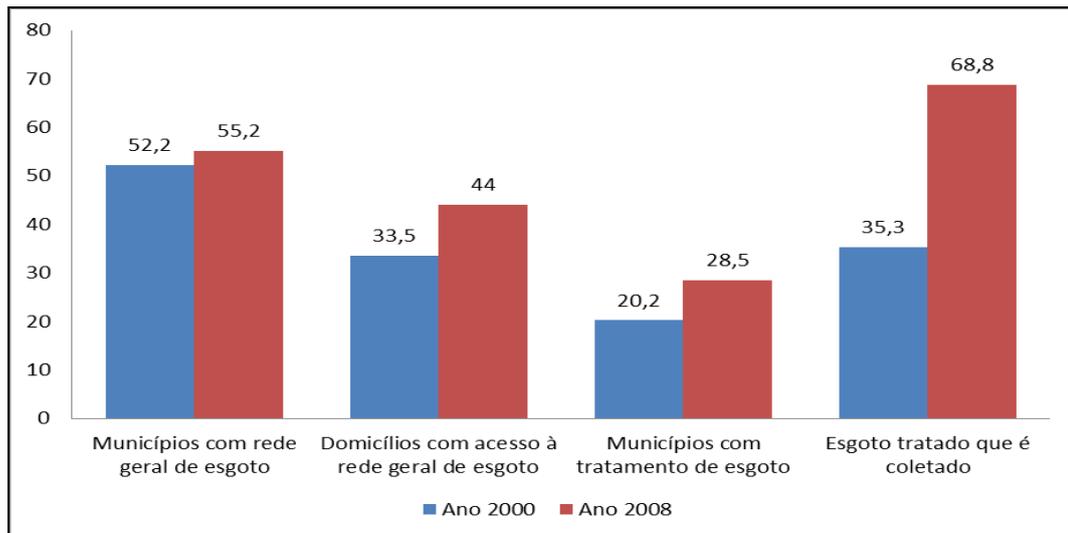
No intuito de minimizar os impactos ambientais e danos à saúde da população, decorrentes da disposição descontrolada de esgotos no meio ambiente, faz-se extremamente necessário seu tratamento efetivo (JORDÃO e PESSOA, 2011). Neste ponto, destaca-se a relevância de adequadas atuações do poder público no saneamento básico do país.

3.2 PANORAMA DO ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO BRASIL

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), os serviços de saneamento básico no Brasil vêm crescendo ao longo das últimas décadas, principalmente mediante ações governamentais como o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB).

O Atlas de Saneamento 2011 (IBGE, 2011) destaca que, apesar de ainda existirem diferenças regionais marcantes nos serviços municipais de esgotamento sanitário, no período entre os anos 2000 a 2008 houve um discreto aumento no número de municípios atendidos pelo saneamento básico em todas as regiões do Brasil.

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) do ano de 2008 (IBGE, 2010), a quantidade de municípios brasileiros que possuíam serviço de esgotamento sanitário por rede coletora aumentou em 3% em relação ao ano de 2000 (Figura 1).



Fonte: IBGE (2011)

Figura 1 Evolução percentual de algumas variáveis do esgotamento sanitário no Brasil.

Apesar dos avanços constatados nos últimos anos, no ano de 2008 o serviço de esgotamento sanitário por meio de rede coletora de esgoto estava disponível para apenas 55,2% dos municípios brasileiros (IBGE, 2011). Valores bem distantes do ideal.

Além disso, de acordo com os dados expressos na Figura 1, poucos são os municípios no Brasil que possuem algum sistema de tratamento de esgoto (28,5%), sendo que apenas 44% do total de municípios brasileiros possuem acesso à rede geral de esgoto (IBGE, 2011).

O Quadro 1 apresenta detalhadamente, por regiões geográficas, a evolução dos níveis de coleta e tratamento de esgoto urbano em relação à quantidade de municípios da região.

Quadro 1 Níveis de atendimento de coleta e tratamento de esgoto urbano nos municípios brasileiros até o ano de 2009.

BRASIL E GRANDES REGIÕES	TOTAL DE MUNICÍPIOS		MUNICÍPIOS COM REDE COLETORA DE ESGOTO	
	2000	2008	2000	2008
Brasil	5.507	5.564	2.877	3.069
Norte	449	449	32	60
Nordeste	1.787	1.793	767	819
Sudeste	1.666	1.668	1.547	1.586
Sul	1.159	1.188	451	472
Centro-Oeste	446	466	80	132

Fonte: IBGE (2011)

Destacam-se os baixos níveis percentuais de coleta das regiões Norte, Nordeste, Sul e Centro-Oeste, apesar da evolução atingida em 8 anos. Grande parte destes municípios é de pequeno ou médio porte.

3.3 SISTEMAS INDIVIDUAIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO

Mediante os problemas de carência de redes de coleta e tratamento do esgoto de muitos municípios e localidades brasileiras, principalmente em áreas pouco densamente povoadas e nos bairros de nível socioeconômico mais baixo, torna-se necessário a adoção de alternativas possíveis para o destino dos esgotos produzidos (ANDREOLI e POMPEO, 2009).

Segundo Andreoli e Pompeo (2009), algumas das destinações comuns para o esgoto produzido nos domicílios, quando não existem coleta e tratamento adequado, são os lançamentos nas redes de drenagem de águas pluviais, em valas de drenagem, no solo ou nos cursos hídricos. Entretanto, em sua maioria destaca-se a utilização de sistemas individuais de tratamento e destinação de esgoto (SITDE).

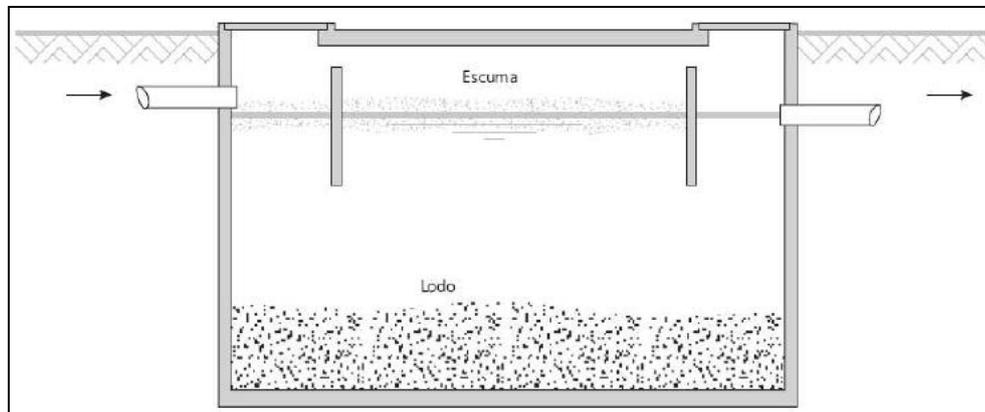
São diversas as unidades classificadas como SITDE, que podem até ser confundidas entre si. Destacam-se como os mais conhecidos e utilizados na prática os tanques sépticos, sumidouros ou vala de infiltração e a fossa negra.

De acordo com Jordão e Pessôa (2011, p. 392), fossa ou tanque séptico consiste basicamente em “um dispositivo de tratamento de esgotos destinado a receber a contribuição de um ou mais domicílios e com capacidade de dar aos esgotos um grau de tratamento compatível com sua simplicidade e custo”.

A Norma Brasileira NBR 7.229 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1993, p.2), define tanque séptico como “unidade cilíndrica ou prismática retangular de fluxo horizontal para tratamento de esgotos por processos de sedimentação, flotação e digestão”.

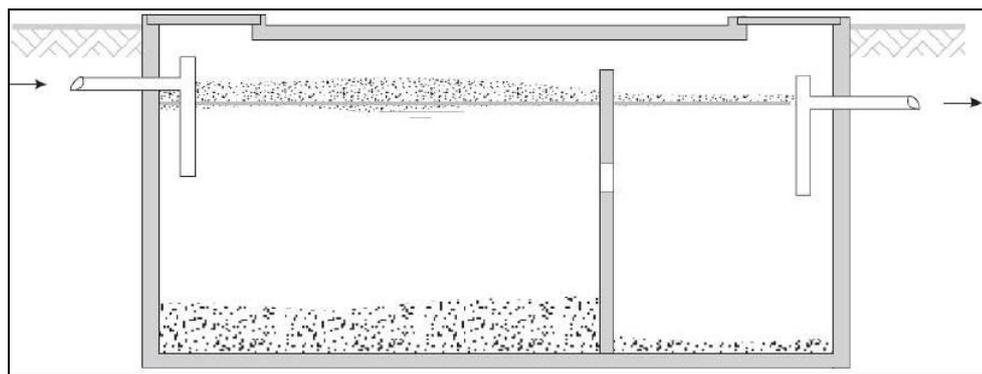
De maneira geral, um tanque séptico é caracterizado como uma câmara construída para reter esgotos sanitários por um determinado período de tempo, criteriosamente estabelecido, que permita a sedimentação dos sólidos, a retenção de materiais graxos e a degradação e estabilização bioquímicas de determinadas substâncias presentes no esgoto (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

Os tanques sépticos podem possuir diferentes configurações, podendo apresentar câmara única (Figura 2), câmaras em série (Figura 3) ou câmaras sobrepostas, além de outras estruturas possíveis (ANDRADE NETO et al., 1999).



Fonte: Andrade Neto et al. (1999)

Figura 2 Tanque séptico de câmara única.



Fonte: Andrade Neto et al. (1999)

Figura 3 Tanque séptico de câmara dupla.

Os sumidouros ou valas de infiltração são aqueles que recebem efluentes dos tanques sépticos com a função de infiltrá-los no solo (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

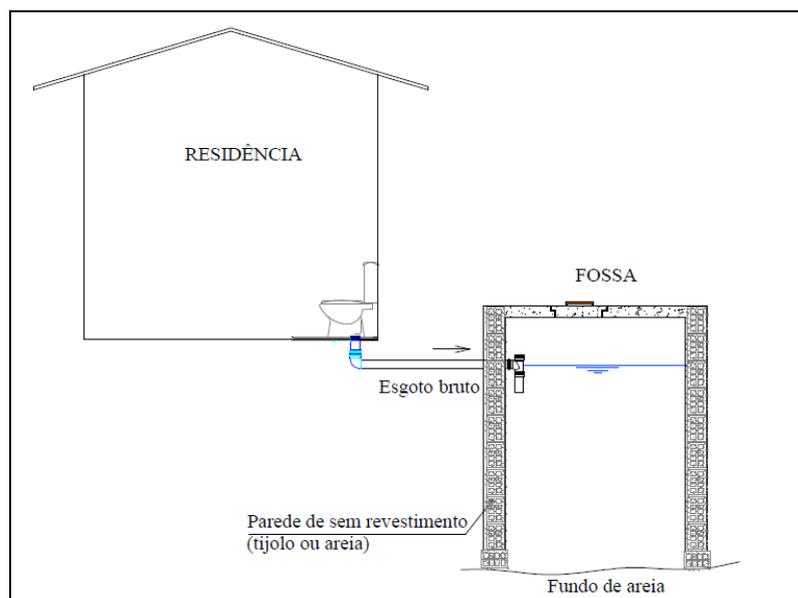
Podem ser de formato cilíndrico ou prismático, com suas paredes de pedra, tijolo (Figura 4), manilha de concreto ou outros, sendo que estas não devem ser revestidas para permitir a infiltração do líquido. No fundo e/ou no entorno das laterais pode haver uma camada de brita ou areia para propiciar a filtração do esgoto tratado (ANDRADE NETO et al., 1999).



Fonte: Edibasconstruções (2013)

Figura 4 Sumidouro implantado com paredes revestidas por tijolos.

Em contrapartida aos tanques sépticos, as fossas negras (Figura 5), conhecidas apenas como fossa ou fossa rudimentar, não possuem suas paredes impermeabilizadas. Nela, o esgoto é disposto e infiltrado no solo conforme entra, funcionando como sumidouro. As fossas podem apresentar as paredes de tijolo furado, manilha de cimento, areia ou até cimentada (com fundo de areia). O fundo pode ser de areia, de tijolo ou cimentado (com paredes permeáveis). Normalmente não possui dispositivo de saída de efluente tratado para o sumidouro como os tanques sépticos, no entanto verificam-se casos de ocorrência (RATIS, 2009).



Fonte: Ratis (2009)

Figura 5 Esquema de uma fossa recebendo esgoto sanitário de uma residência.

A diferenciação básica entre uma fossa e um tanque séptico é o fato de que o tanque séptico consiste em uma unidade de tratamento de esgotos, com efluente a ter um destino final (geralmente a infiltração no solo por meio de sumidouro ou vala de infiltração), enquanto que a fossa é utilizada para disposição final, sem tratamento dos esgotos (HARTMANN et al., 2009).

Os SITDE podem ainda apresentar outras unidades para auxílio no tratamento do esgoto, tais como flotores, filtros anaeróbios e zona de raízes. Entretanto, ainda são pouco comuns na prática. Seu uso pode caracterizar-se como uma forma adequada de gestão do esgoto sanitário, diminuindo os riscos de contaminação da água e do solo (INGUNZA et al., 2009; JORDÃO e PESSÔA, 2011), uma vez projetados e operados adequadamente, segundo as normas específicas.

Estima-se que 37,68% da população urbana brasileira (68 milhões de habitantes) e 63,72% da população rural (12 milhões de habitantes) tenham seus esgotos tratados por algum destes sistemas (IBGE, 2011).

3.4 RESÍDUOS GERADOS PELOS SITDE

À medida que os sistemas individuais de tratamento e disposição de esgoto (SITDE) recebem o esgoto sanitário, ocorrem reações físico-químicas e biológicas, acarretando no acúmulo de materiais de fração sólida e líquida nestes ambientes, além da geração de gases e materiais flutuantes (escuma). Esses materiais, aqui denominados de resíduos de fossas e tanques sépticos (RFTS), são comumente esgotados por caminhões limpa-fossa (durante a etapa de limpeza dos SITDE) e podem causar enormes problemas ambientais e sanitários em sua disposição, devido sua elevada carga orgânica e de patógenos (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

A quantidade de RFTS gerada no País é bastante elevada e depende da região, do clima, das condições socioeconômicas, etc. (ANDREOLI e POMPEO, 2009).

Conforme a Norma Brasileira NBR 7.229 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1993), estima-se que a taxa de produção de RFTS fresco é da ordem de até 1,0 litro.hab⁻¹.dia⁻¹ para esgoto tipicamente doméstico.

Conforme Andreoli e Pompeo (2009), a quantidade total de RFTS produzidos pelos SITDE no país resulta em um valor diário de 19,75 mil m³ ou 7,2 milhões de m³ por ano. Entretanto, deve-se destacar que toda esta quantidade não é esgotada anualmente, uma

vez que a limpeza de determinados sistemas pode levar até muitos anos. De qualquer forma, a quantidade de RFTS geradas no país é bastante elevada.

Na cidade de Goiânia, no ano de 2009, foram tratados na Estação de Tratamento de Esgoto Dr. Hélio de Seixo Brito, o conteúdo de uma média de 28 caminhões limpa-fossa por dia, com volume individual variando entre 6 m³ e 16 m³ (RIOS, 2010). Atualmente, este valor é superior a 50 caminhões por dia.

Uma peculiaridade dos RFTS, tanto em sua fração sólida como líquida, é sua elevada variabilidade nos valores de diversos parâmetros físico-químicos (com exceção do pH e temperatura) e principalmente dos microbiológicos, tanto em nível nacional, como em estudos internacionais (LIÉNARD e PAYRASTRE, 1996; KOOTTATEP et al., 2002; INGUNZA et al., 2009).

Os RFTS carecem de definição específica, uma vez que apresentam características intermediárias entre esgoto sanitário e lodo de estações de tratamento de água ou esgoto (INGUNZA et al., 2009).

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica como resíduos sólidos, entre outros, os lodos de sistemas de tratamento de água e esgoto, além daqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição e resíduos líquidos que tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos hídricos. Neste contexto, os RFTS podem ser enquadrados, segundo esta norma, em resíduos de Classe I (perigosos), em virtude de alto grau de patogenicidade.

De maneira geral, estes resíduos, sem tratamento, serão denominados como Resíduos de Fossas e Tanques Sépticos (RFTS). Já a fração sólida retida na superfície do Sistema de Alagado Construído (SAC) proposto será definida como lodo, uma vez que apresenta características mais similares a este.

3.5 TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO GERADO EM SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO

O lodo gerado nos processos físico-químicos e biológicos das unidades de tratamento de esgotos, incluindo as que tratam o RFTS, apresentam características indesejáveis que dificultam sua manipulação e processamento, tais como a presença de organismos patogênicos e de elementos tóxicos de origem orgânica ou mineral, dificuldade de desaguamento e liberação de odores desagradáveis (USEPA, 2007). Neste sentido, faz-se

necessário seu correto gerenciamento, sobretudo seu tratamento, antes de sua destinação final, com vistas a evitar a contaminação do meio ambiente e comprometer a qualidade da saúde da população.

O tratamento do lodo gerado em sistemas de tratamento de esgotos é desenvolvido através de alguns processos, tais como, adensamento, condicionamento e desaguamento, cujo objetivo primário é reduzir o volume do lodo por meio da diminuição da umidade (TSUTIYA, 2001).

Uma vez reduzido o teor de umidade no lodo, um segundo nível de tratamento também pode ser adotado visando estabilizar a matéria orgânica e reduzir o nível de patógenos presentes. São alguns dos processos adotados: a digestão aeróbia e anaeróbia, a compostagem, a secagem térmica e a incineração, além de outros menos difundidos como a pirólise e a oxidação úmida (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

Segundo Tsutiya (2001), existem alternativas que visam o aproveitamento e/ou disposição final do lodo de esgoto, após pré-tratamento. São algumas destas: o uso agrícola, disposição em aterro sanitário, incineração, recuperação de áreas degradadas, disposição em oceanos e rios, reutilização nos processos produtivos das indústrias, aplicação em florestas, entre outros.

Dentre os 5.564 municípios brasileiros, 1.513 possuem algum sistema de tratamento de esgotos, sendo que 1.217 destes fornecem algum tipo de destinação para o lodo gerado (Quadro 2) (BASTOS, 2012).

Quadro 2 Relação da quantidade de municípios brasileiros e formas de destinação do lodo do sistema de tratamento de esgoto municipal.

DESTINAÇÃO	MUNICÍPIOS	PORCENTAGEM (%)
Rio	163	13,39
Mar	1	0,082
Terreno baldio	97	7,970
Aterro sanitário	452	37,14
Incineração	19	1,561
Reaproveitamento	169	13,88
Outros	316	25,97
TOTAL	1.217	100

Fonte: Adaptado de Bastos (2012)

Destaca-se que grande parte do lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETE's) é destinada aos aterros sanitários, fato que acarretam problemas como a redução da vida útil destes.

Dado relevante ainda é que grande parte dos municípios brasileiros, principalmente os de pequeno e médio porte, não contam com aterros sanitários ou mesmo alguma possibilidade de tratamento do lodo gerado em suas ETE's. Muitos deles sequer possuem ETE's.

Em algumas estações de tratamento de esgoto, o lodo gerado é tratado dentro de suas dependências e destinado à recuperação de áreas degradadas ou outro fim. Entretanto, conforme Tsutiya (2001), os custos para o tratamento e disposição final do lodo gerado nos sistemas de tratamento de esgoto são de 20% a 40% do custo operacional total da estação de tratamento de esgoto.

Neste sentido, diante de toda a problemática e dificuldades relacionadas ao tratamento e destinação final dos RFTS e lodo gerado em unidades de tratamento de esgoto sanitário, faz-se necessário a adoção de alternativas simples e de baixo custo de implantação e operação para o correto gerenciamento destes resíduos.

3.6 FITORREMEDIAÇÃO E O CAPIM VETIVER

Nos últimos anos tem emergido uma tecnologia alternativa, denominada de fitoremediação, para descontaminação de águas, solos e sedimentos, eliminando metais pesados e poluentes orgânicos presentes no meio (BAIRD, 2002).

O termo fitoremediação consiste na tecnologia à base de plantas, de ocorrência natural ou geneticamente modificadas, utilizadas na descontaminação de determinados ambientes (SARMA, 2011).

A utilização de organismos vivos, sobretudo de plantas, no tratamento de esgoto representa uma tecnologia emergente que está se revelando como uma alternativa, eficiente e de baixo custo, aos sistemas convencionais. Esses sistemas podem ser implantados no local onde o esgoto é produzido, podem ser operados por pessoas de baixa escolaridade, demandam pouca energia e são mais flexíveis e menos susceptíveis a variações nas taxas de aplicação (BRIX, 1994; SOLANO, SORIANO e CIRIA, 2004).

Andrade, Tavares e Mahler (2007) classificam os mecanismos de fitoremediação em fitoextração, fitodegradação, fitovolatilização, fitoestimulação e fitoestabilização, da seguinte forma:

- Fitoextração: processo pelo qual a planta, através do sistema radicular, absorve o poluente presente no meio, armazenando-o em seu tecido vegetal;
- Fitodegradação: processo pelo qual o poluente sofre bioconversão no interior da planta ou em sua superfície, transformando-se em formas menos tóxicas ou inertes;
- Fitovolatilização: mecanismo no qual o poluente é absorvido e convertido em forma volátil, sendo posteriormente liberado na atmosfera;
- Fitoestimulação: mecanismo de interação entre o sistema radicular da planta e microrganismos, que em conjunto promovem a biodegradação dos poluentes presentes no meio;
- Fitoestabilização: processo no qual o poluente presente no meio é imobilizado por meio da lignificação ou humificação.

Segundo os mesmos autores, a utilização da fitoremediação para descontaminação de solos e de ambientes aquáticos vem se destacando atualmente frente a outras tecnologias, principalmente em relação ao custo (Quadro 3), justificando sua crescente adoção em diversos países.

Quadro 3 Custo da fitoremediação, utilizando raízes de gramíneas, em comparação com outras tecnologias de remediação de ambientes contaminados.

TIPO DE TRATAMENTO	CUSTO VARIÁVEL POR TONELADA (R\$)
Fitoremediação	20-70
Biorremediação no local	100-300
Ventilação do solo	40-440
Tratamento térmico indireto	240-600
Lavagem do solo	160-400
Solidificação/estabilização	480-680
Extração por solvente	720-880
Incineração	400-3.000

Fonte: Adaptado de Andrade, Tavares e Mahler (2007)

São diversas as espécies vegetais que possuem capacidade de remediar ambientes contaminados, principalmente por metais, apresentando-se como alternativa menos dispendiosa para recuperação de ambientes (Quadro 4).

Quadro 4 Exemplos de espécies vegetais e os respectivos metais que estas podem remediar.

ESPÉCIE	METAL
<i>Alyssum wulfenianum</i>	Ni
<i>Azolla pinnata</i>	Cr e Cu
<i>Brassica juncea</i>	Cu e Ni
<i>Arabidopsis hallerii</i>	Cd
<i>Pteris vittata</i>	As, Cu, Ni e Zn
<i>Psychotria douarrei</i>	Ni
<i>Pelargonium sp.</i>	Cd
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Cd, Ni, Pb e Zn
<i>Arabis gemmifera</i>	Cd e Zn
<i>Pistia stratiotes</i>	Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb e Zn
<i>Piptathertan miliacetall</i>	Pb
<i>Spartinas plants</i>	Hg
<i>Astragalus bisulcatus</i>	Se
<i>Sedum alfredii</i>	Cd
<i>Sesbania drummondi</i>	Pb
<i>Lemna gibba</i>	As
<i>Chengiopanax sciadophylloides</i>	Mn
<i>Tamarix smyrnensis</i>	Cd
<i>Brassica napus</i>	Cd
<i>Rorippa globosa</i>	Cd
<i>Crotalaria juncea</i>	Cr e Ni

Fonte: Adaptado de Sarma (2011)

Além da remediação de ambientes contaminados por metais, a utilização das plantas também é destaque na remoção de carga orgânica, de compostos orgânicos tóxicos, de nutrientes e de organismos patogênicos das mais variadas fontes (SARMA, 2011).

Plantas de diversas espécies têm sido utilizadas no tratamento de variadas fontes de águas residuárias, a exemplo do arroz (*Oryza sativa* L.) (SILVA, 2007), caniço (*Phragmites australis*) (LIÉNARD e PAYRASTRE, 1996; HABERL, PERFLER e MAYER, 1995; ARIAS et al., 2003; STOTTMEISTER et al., 2003), capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) (TRUONG e HART, 2001), capim-canarana-erecta-lisa (*Echinochloa pyramidalis*) (NOUMSI et al., 2006), capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum) e capim-tifton (*Cynodon dactylon* Pers.) (MATOS et al., 2010), junco (*Juncus ingens*)

(HABERL, PERFLER e MAYER, 1995), lírio-do-brejo (*Hedychium coronarium* J. König) (ALMEIDA, PITALUGA e REIS, 2010), papiro (*Cyperus papyrus* L.) (NOUMSI et al., 2006), taboa (*Typha* sp.) (STOTTMEISTER et al., 2003; BRASIL, MATOS e SOARES, 2007; ALMEIDA, PITALUGA e REIS, 2010).

O uso do Capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) foi primeiramente aplicado como técnica de conservação do solo e da água. Entretanto, nas últimas décadas, suas aplicações têm sido estendidas para aplicações no campo de recuperação de áreas degradadas e tratamento de resíduos líquidos e sólidos. Pesquisas realizadas na Austrália, China, Tailândia, Vietnã e Senegal comprovaram sua eficiência no tratamento de águas poluídas, efluentes domésticos, águas residuárias industriais e chorume (TRUONG e HART, 2001).

Esta espécie vegetal possui características variadas para sobrevivência em diversos ambientes tais como resistência a pragas, doenças, déficit hídrico, alagamentos, geadas e fogo. Possui adaptabilidade a variados níveis de umidade e temperatura (-15 a 55°C) e baixa fertilidade de solo. Também é tolerante a altos níveis de acidez e alcalinidade (pH 3,3 a 9,5), de salinidade, de Al (85% de saturação) e de Mn (578 mg kg⁻¹), além de uma vasta gama de metais pesados (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se e Zn) (DANH et al., 2009).

Segundo Truong (1999), a planta possui crescimento ereto, formando touceiras. Reproduz somente por mudas. Apresenta sistema de raízes densas e de alta resistência, atingindo até 3 m de profundidade.

Conforme Danh et al. (2009), com o desenvolvimento de estudos sobre os aspectos fisiológicos da espécie *Chrysopogon zizanioides* (Capim Vetiver), esta vem demonstrando-se como ótima alternativa na tecnologia de fitoremediação, principalmente na capacidade de acúmulo de metais pesados, em especial de ferro e zinco.

A utilização da espécie *Chrysopogon zizanioides* no processo de fitoremediação de ambientes contaminados com metais pesados apresenta diversos exemplos de aplicações pelo mundo: China (SHU e XIA, 2005), Tailândia (ROTKITTIKHUN et al., 2006), Indonésia (MANGKOEDIHARDJO e TRIASTUTI, 2011), dentre outros.

Estudos apontam que o Capim Vetiver também é capaz de absorver e promover a degradação biológica de compostos orgânicos como 2,4,6-trinitrotolueno, fenol, etil brometo, benzopireno e atrazina (DANH et al., 2009).

Na Venezuela, existem estudos sobre a utilização desta planta na remediação de solos contaminados com hidrocarbonetos de petróleo (BRANDT et al., 2006). E mais recentemente, pesquisas apontam para o uso potencial da espécie vegetal na remoção de

antibióticos (tetraciclina) presentes em águas residuárias oriundas das atividades humanas (DATTA et al., 2013).

Por outro lado, sua aplicação na redução de organismos patogênicos e carga orgânica presentes em águas residuárias ainda necessitam de mais estudos.

De maneira geral, segundo Truong e Hart (2001), o Capim Vetiver tem sido utilizado para os mais diferentes propósitos de proteção ambiental em cerca de 40 países de clima tropical e subtropical. Neste sentido, a utilização desta espécie vegetal para tratamento dos RFTS pode apresentar-se como ótima alternativa e merece ser estudada.

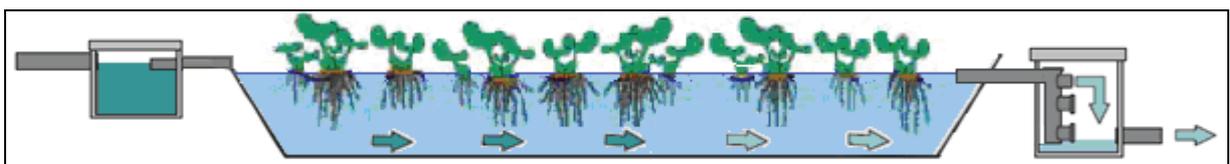
3.7 WETLANDS CONSTRUÍDAS OU ALAGADOS CONSTRUÍDOS

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA, 2013, p.10), os *wetlands* consistem em “áreas que são inundadas ou saturadas, de superfície ou subterrâneas, com frequência e duração suficiente, que suportam e propiciam circunstâncias normais de prevalência de vegetação tipicamente adaptada à vida em condições de solo saturado [tradução do autor]”.

Sabendo-se que os sistemas naturais podem melhorar a qualidade da água e reduzir a carga de poluentes no ambiente, engenheiros e cientistas constroem sistemas que replicam as funções de zonas húmidas naturais, denominados *wetlands* construídas ou alagados construídos. Neste trabalho foi adotada a terminologia Sistemas de Alagados Construídos (SAC's). São sistemas de engenharia concebidos e construídos para utilizar os processos naturais que envolvem a vegetação de zonas húmidas, os solos, além da comunidade microbiana, para tratar águas residuais (NIKOLIĆ, MILIĆEVIĆ e MILENKOVIĆ, 2009).

Baseado no princípio de funcionamento desejado e na espécie vegetal escolhida, os SAC's podem apresentar, conforme Brix (2003):

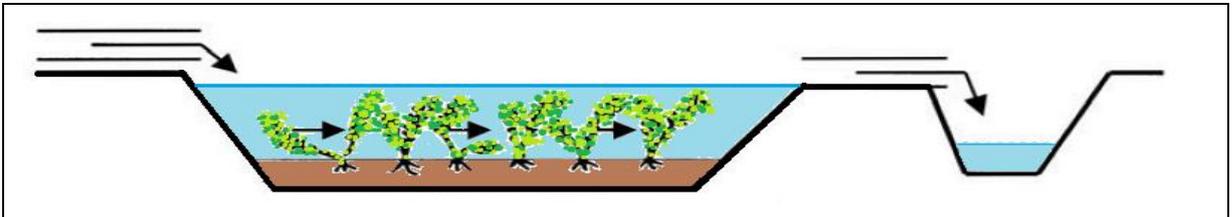
- plantas aquáticas flutuantes livres (Figura 6): ocorrem livremente na superfície da água, com suas raízes submersas e suas folhas geralmente fora da água;



Fonte: Nikolić, Milićević e Milenković (2009)

Figura 6 Esquema de um Sistema de Alagados Construídos (SAC) com plantas flutuantes livres.

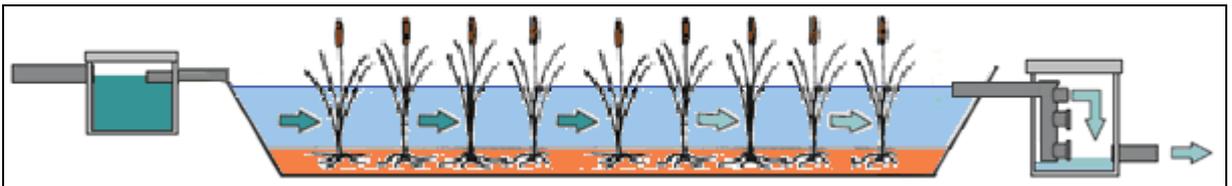
- plantas aquáticas submersas (Figura 7): vivem inteiramente abaixo da superfície da água. Algumas espécies têm suas raízes livres e são chamadas de submersas livres ou não ancoradas e podem ser arrastadas pela correnteza;



Fonte: Nikolić, Milićević e Milenković (2009)

Figura 7 Sistema de Alagados Construídos (SAC), com plantas submersas.

- plantas aquáticas emergentes (Figura 8): suas raízes estão ancoradas no fundo do corpo d'água. Possuem longos talos ou caules e suas folhas estão na superfície da água ou acima dela.



Fonte: Nikolić, Milićević e Milenković (2009)

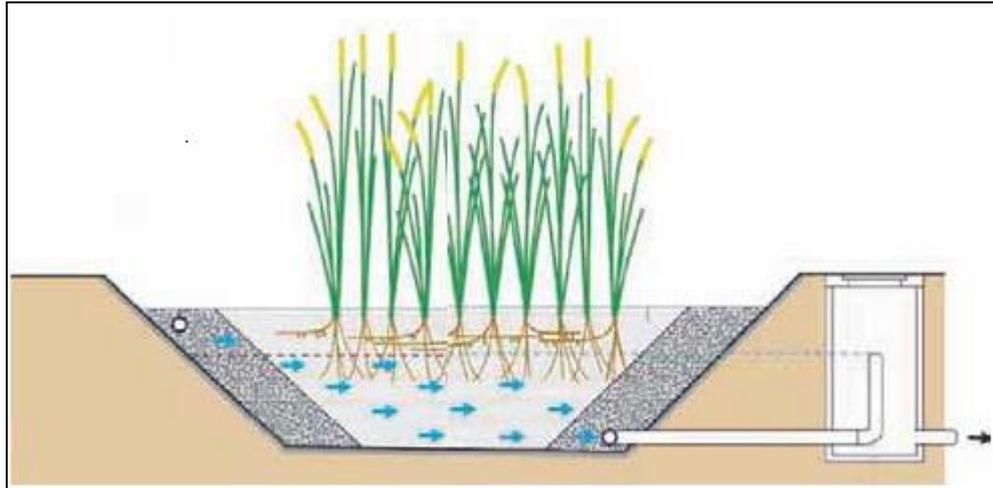
Figura 8 Esquema de um Sistema de Alagados Construídos (SAC) com plantas aquáticas emergentes.

De acordo com Kadlec e Wallace (2009), em SAC's com plantas aquáticas emergentes o sistema pode ser classificado segundo o fluxo da água em:

- sistema de fluxo superficial;
- sistema de fluxo subsuperficial horizontal;
- sistema de fluxo subsuperficial vertical (ascendente ou descendente);
- sistemas híbridos (em que se utiliza uma combinação dos sistemas anteriores).

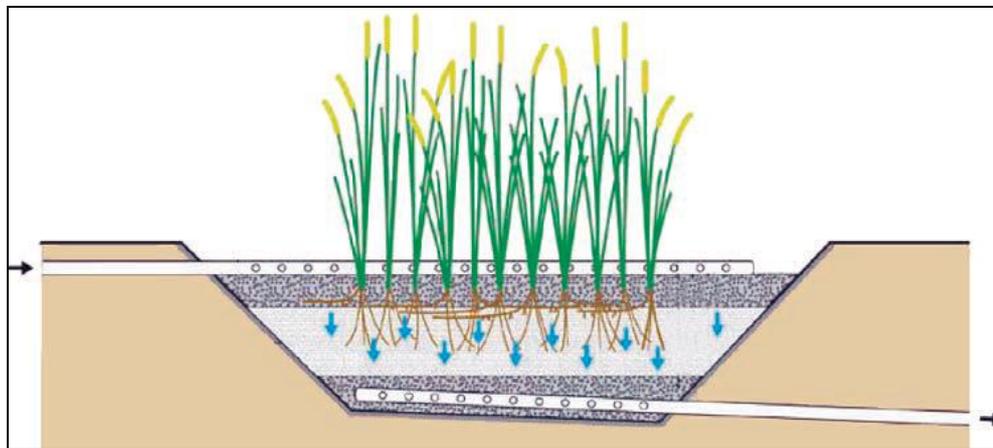
O sistema de fluxo superficial é aquele em que a superfície da água sempre está em contato direto com a atmosfera, conforme apresentado nas Figuras 6, 7 e 8.

Já o sistema de fluxo subsuperficial consiste naquele em que a superfície líquida não está em contato direto com a atmosfera e sim, abaixo da superfície do substrato no leito de tratamento. A direção predominante do fluxo pode ser horizontal (Figura 9) ou vertical (Figura 10), sendo este último em nível ascendente ou descendente.



Fonte: UN-HABITAT (2008)

Figura 9 Esquema de um Sistema de Alagado Construído de fluxo subsuperficial horizontal.



Fonte: UN-HABITAT (2008)

Figura 10 Esquema de um Sistema de Alagado Construído de fluxo subsuperficial vertical descendente.

Segundo o aspecto hidrológico, os SAC's geralmente possuem fluxo lento com profundidades rasas, proporcionando um tempo de contato prolongado entre a água e o ambiente, promovendo interações entre a massa complexa de materiais orgânicos e inorgânicos e a diversidade de microrganismos e plantas (NIKOLIĆ, MILIĆEVIĆ e MILENKOVIĆ, 2009).

Conforme UN-HABITAT (2008), os SAC's podem apresentar diferentes características e princípios de funcionamento, variando principalmente em função do efluente a ser tratado e da eficiência final desejada. Geralmente, suas estruturas físicas básicas são:

- substrato: consiste no meio suporte de desenvolvimento da vegetação e dos microrganismos, propiciando ambiente adequado para interações físicas, químicas e microbiológicas do meio com o contaminante. Geralmente utiliza-se brita, areia, cascalho, solo ou materiais orgânicos;

- vegetação: trata-se da espécie ou espécies vegetais escolhidas para o sistema, com a função de interagir com os contaminantes, além do substrato e da comunidade microbiológica presente, removendo-os;

- unidades auxiliares: possuem funções importantes no correto funcionamento do SAC. Destacam-se os sistemas de impermeabilização, de drenagem de águas pluviais, de distribuição dos resíduos, etc.

O uso destes ambientes no controle de poluição dos recursos hídricos tem sido bastante difundido pelo mundo a partir do final dos anos 80 e principalmente a partir do início dos anos 90, destacando-se que as primeiras aplicações ocorreram na década de 1950 (USEPA, 2000).

A USEPA (2000) caracteriza os SAC's como sistemas que podem realizar o tratamento de águas residuais em ambientes rasos, geralmente menos do que 1 m de profundidade, que têm sido usados no tratamento de uma variedade de águas residuárias, incluindo águas de drenagem, esgoto doméstico, industrial e agrícola, além de águas ácidas oriundas da drenagem de minas.

De acordo com Brasil e Matos (2008), o processo de tratamento de águas residuárias em SAC's caracteriza-se como sistemas robustos e de baixos custos e simplicidade de operação e manutenção, favorecendo a implantação em regiões carentes de saneamento.

Diversos são os trabalhos pelo mundo, utilizando as mais variadas espécies vegetais, para tratamento de águas residuárias em alagados construídos. São exemplos, na Alemanha, Áustria, França, Holanda, Reino Unido (HABERL, PERFLER e MAYER, 1995), Austrália (GREENWAY, 1997), Estados Unidos e Canadá (USEPA, 2000), Dinamarca (ARIAS et al., 2003), Tailândia (KOOTTATEP et al., 2004a), Sérvia (NIKOLIĆ, MILIĆEVIĆ e MILENKOVIĆ, 2009), entre diversos outros países pelo mundo.

No Brasil destacam-se pesquisas como as de Almeida (2005), Brasil, Matos e Soares (2007), Philippi et al. (2007), Silva (2007), Almeida, Pitaluga e Reis (2010), Matos et al. (2010), Quege, Almeida e Ucker (2013), entre diversos outros trabalhos.

Mesmo existindo diversas pesquisas com SAC's no Brasil, o uso de alagados construídos para tratar RFTS é bem menos difundido e estudado, destacando-se algumas experiências internacionais como referências de apoio.

Em geral, poucos são os trabalhos realizados pelo mundo visando tratar exclusivamente os RFTS. A maioria descreve o processo de desaguamento de outros tipos de lodo, não apenas em SAC's, mas também em leitos de secagem sem vegetação (KIM e

SMITH, 1997; VASSILIOS e TSIHRINTZIS, 2011). É consenso que estes sistemas apresentam diversas vantagens, mas que ainda não existem critérios consagrados para seu dimensionamento, construção e operação.

O trabalho de Liénard e Payrastre (1996) foi um dos pioneiros no tratamento de RFTS em sistemas de alagados construídos, juntamente com o de Koottatep et al. (2002), ambos em países e climas diferentes do brasileiro.

O primeiro foi realizado em Lyon, França, aplicando-se os resíduos em dois tanques cultivados com caniço (*Phragmites australis*) e coluna de 60 cm de agregados durante dois anos. Durante este período, as taxas de aplicações utilizadas foram de 7,10 L.m⁻².dia⁻¹ e 190g SST.m⁻².dia⁻¹, que resultaram em uma eficiência de tratamento da fase lixiviada variável de 60-90%, dependendo do parâmetro analisado.

Outro trabalho clássico, tratando RFTS em alagados construídos, foi realizado em Bangkok, capital da Tailândia. De acordo com Koottatep et al. (2002) e Koottatep et al. (2004a), que basearam-se no trabalho de Liénard e Payrastre (1996), foi desenvolvido um sistema de alagados construídos de fluxo vertical utilizando-se a espécie vegetal taboa (*Typha angustifolia*). A avaliação do sistema, que foi acompanhado por sete anos, mostrou que a taxa ótima de aplicação é de 250 kg ST.m⁻².ano⁻¹ e que o tempo de detenção hidráulica adequado é de aproximadamente 6 dias para a fração líquida.

No Brasil, destacam-se os bons resultados da pesquisa de Suntti, Magri e Philippi (2011) para tratamento de RFTS em SAC utilizando-se a espécie *Zizaniopsis bonariensis*. Naquele trabalho utilizaram-se duas taxas de aplicação de sólidos totais (250 kg ST.m⁻².ano⁻¹ e 125 kg ST.m⁻².ano⁻¹). Os resultados revelaram que a taxa menor apresentou melhor desempenho em relação à maior em termos de remoção de sólidos totais (96%), demanda química de oxigênio (99%) e nitrogênio amoniacal (72%). Além disso, com a aplicação da menor taxa, houve melhor desaguamento do RFTS, tendo o lodo acumulado apresentado umidade de 67% e teor de sólidos totais de 33%.

Para o tratamento de outros tipos de lodos, pode-se encontrar na literatura diversos trabalhos com variadas eficiências e linhas de pesquisa.

A efetividade do SAC para tratamento do lodo de uma estação de tratamento de esgoto municipal foi comprovada pela remoção de sólidos suspensos e DBO superiores a 90%, além de taxas de remoção de nitrato e fósforo de 90% e 80%, respectivamente (BEGG, LAVIGNE e VENEMAN, 2001).

Aplicando-se lodo ativado em um SAC por um período de dez anos, Nielsen e Willoughby (2007) verificaram que a taxa máxima de aplicação deve ser de aproximadamente 50-60 kg ST.m⁻².ano⁻¹. Neste período, o acúmulo de lodo superficial variou de 1,2 a 1,5 metros nos diferentes leitos, com teor de sólidos secos de 30 a 40%.

No que tange o tratamento e destinação final da fração líquida dos esgotos, são muitos os trabalhos publicados, tanto utilizando RFTS como outros tipos de lodo. Entretanto, poucas são as pesquisas que se dedicam inteiramente às transformações ocorridas no lodo acumulado na superfície dos leitos de tratamento.

Koottatep et al. (2004a) avaliaram o acúmulo de lodo superficial com taxa de cerca de 1 cm ao mês e sugeriu possibilidades de uso agrícola, todavia sem apresentar estudos específicos que comprovassem esta alternativa.

Begg, Lavigne e Veneman (2001) observaram que a remoção de metais no lodo superficial foi de 87%, destacando-se a capacidade de absorção de metais pelas plantas.

Nielsen e Willoughby (2007) constataram que a qualidade do lodo final possibilitou o uso agrícola segundo as normas ambientais e sanitárias locais, levando-se em consideração os teores de metais pesados, compostos orgânicos tóxicos e organismos patogênicos.

Já Suntti, Magri e Philippi (2011) atestaram variação na altura da camada de lodo acumulada, que segundo eles, ocorreu em função do processo de desaguamento e mineralização do lodo. Neste trabalho, foi sugerida a retirada do lodo após muitos anos de aplicações e uso na agricultura ou como condicionante do solo.

Neste sentido, existe a necessidade de implantação de estudos voltados às características sociais, econômicas e climáticas brasileiras, visando proporcionar soluções adequadas para o tratamento e destinação final dos RFTS, em especial de sua fração sólida acumulada na superfície do SAC.

3.8 USO AGRÍCOLA DO LODO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Uma vez gerado, o lodo de sistemas de tratamento de esgoto deve ser tratado e destinado de forma correta.

Como destinação final ambientalmente adequada, o uso agrícola do lodo tratado pode ser uma alternativa aplicável. Entretanto, existe a necessidade de estudos que

comprovem sua eficiência, assim como o atendimento à legislação e normas ambientais vigentes.

Segundo Coraucci Filho et al. (1999), o processo de disposição de lodo no solo consiste em uma tecnologia alternativa que utiliza conceitos de ciência e engenharia para seu tratamento e disposição, apresentando uma série de vantagens tais como, o benefício agrícola, o baixo investimento, o pequeno custo de operação e o baixo consumo de energia.

A aplicação de lodo de esgoto doméstico na agricultura vem sendo estudada e tratada como uma alternativa natural de fonte de nutrientes para o solo nos Estados Unidos, desde a década de 1970. No entanto, fatores econômicos e ambientais, como o acúmulo de metais pesados e de patógenos no solo, mereceram acompanhamento e destaque ao longo dos anos (MANSON; MERRITT, 1975).

Os benefícios da aplicação de lodo de esgoto no solo são consolidados quanto ao fornecimento de nutrientes às plantas, estimulação da atividade enzimática (desidrogenase) no solo, aumento da taxa de mineralização de nitrogênio e aumento da produção de biomassa da planta (ARAÚJO, GIL e TIRITAN, 2009). No entanto, segundo Rangel et al. (2006), mesmo os lodos de esgoto sendo uma fonte importante de nutrientes para as culturas, os teores de organismos patogênicos em sua constituição podem limitar seu uso em solos agrícolas.

O Quadro 5 apresenta os valores de ovos viáveis de helmintos e coliformes termotolerantes encontrados em estudos realizados pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), pela companhia de saneamento do Paraná (FAE/SANEPAR) e pela Universidade de São Paulo (Campus São Carlos), avaliando-se os RFTS. Os valores foram obtidos mediante análises microbiológicas dos RFTS coletados em caminhões “limpa-fossa” das regiões de estudo.

Quadro 5 Valores médios de patógenos presentes nos Resíduos de Fossas e Tanques Sépticos esgotados por caminhões “limpa-fossa”.

PARÂMETRO	INSTITUIÇÃO	ANÁLISES	VALOR MÉDIO
Ovos viáveis de helmintos	UFRN	32	17,76 ovos L ⁻¹
Ovos viáveis de helmintos	UFRN	26	13,83 ovos L ⁻¹
Ovos viáveis de helmintos	FAE/SANEPAR	11	2,04 ovos L ⁻¹
Coliformes termotolerantes	UFRN	33	1,42 x 10 ⁷ NMP 100 mL ⁻¹
Coliformes termotolerantes	USP/EESC	6	5,48 x 10 ⁶ NMP 100 mL ⁻¹

Fonte: Adaptado de Ingunza et al. (2009)

Uma vez que os RFTS sejam dispostos no SAC, existe a tendência de acúmulo de microrganismos patogênicos no lodo superficial, tendo em vista que principalmente os ovos viáveis de helmintos são bastante resistentes.

A presença de organismos patogênicos no lodo é fator limitante para seu uso em áreas agrícolas em virtude do risco potencial de contaminação do ambiente (ANDREOLI, CHERUBINI e FERREIRA, 2002) e das pessoas. Assim, para que o lodo de esgoto possa ser utilizado seguramente como fertilizante agrícola ou até mesmo disposto no meio, é necessário que passe por um processo de desinfecção eficaz, reduzindo a concentração dos organismos patogênicos.

No Brasil, o uso agrícola de lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto sanitário é regulamentado pela resolução nº 375 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2006). Tal resolução veta a utilização agrícola de RFTS provenientes de sistema de tratamento individual (fossa/tanque séptico) antes de seu tratamento.

Havendo poucos estudos e sendo recentes as discussões sobre o uso de lodo na agricultura, as normas brasileiras sobre aplicação desta atividade são baseadas em estudos, normas e parâmetros desenvolvidos em âmbito internacional.

A primeira norma brasileira que regulamentou o uso agrícola de lodo foi a Norma CETESB 4.545 (CETESB, 1999), baseada na versão mais antiga da norma estadunidense EPA CFR 40 Part 503 (USEPA, 2007).

Conforme Hespanhol (2001), a utilização de lodos em áreas agrícolas deve ser desenvolvida mediante estudos locais que visem adotar critérios e padrões que estabeleçam quantidades adequadas do material a ser aplicado no solo. Segundo o autor, a mobilidade e comportamento no solo dos parâmetros microbiológicos e compostos químicos potencialmente tóxicos presentes nos biossólidos devem ser avaliados para elaboração de diretrizes sobre seu uso em áreas agrícolas.

Este autor destaca que os esgotos brutos gerados no Brasil são caracterizados por apresentar elevadas concentrações de ovos de helmintos, fato que, de modo geral, não ocorre em países desenvolvidos, especialmente da Europa e América do Norte.

Neste sentido, a adoção de estudos regionais que fomentem a elaboração de diretrizes para o uso agrícola do lodo de esgoto deve ser estimulada, uma vez que as atuais diretrizes são baseadas em normas internacionais, em condições climáticas, ambientais, sociais e econômicas diferentes das brasileiras.

De forma geral, a resolução nº 375 do CONAMA estabelece, entre outras exigências e restrições, que para uso agrícola, os teores de microrganismos no lodo devem seguir os valores do Quadro 6. Segundo o documento, o lodo de esgoto ou produto derivado deverá ser higienizado, ou seja, submetido a processo de tratamento de redução de patógenos de acordo com os níveis estabelecidos.

Quadro 6 Classes de lodo de esgoto ou produto derivado segundo agentes patogênicos.

TIPO DE LODO	CONCENTRAÇÃO DE PATÓGENOS
A	Coliformes Termotolerantes: $< 10^3$ NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos: $< 0,25$ ovo / g de ST <i>Salmonella</i> spp: ausência em 10 g de ST Vírus entéricos: $< 0,25$ UFP ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes: $< 10^6$ NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos: < 10 ovos / g de ST

Fonte: Conama (2006)

O uso agrícola do lodo está relacionado à classe em que este se enquadrar e à cultura permitida, conforme estabelece a referida resolução. Só é permitido o uso agrícola para lodos que se enquadrem na classe A e, ainda, os fatores relacionados ao manejo e monitoramento deverão ser seguidos.

A mesma resolução estabelece que para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado deverá estar estabilizado, ou seja, não apresentar potencial de geração de odores e de atratividade de vetores, mesmo quando reumidificados.

O processo de estabilização do lodo é um parâmetro fundamental no que diz respeito ao seu tratamento, pois reduz a atividade biológica, minimiza a liberação de odores desagradáveis e a presença de organismos patogênicos.

Aisse et al. (1999, p. 291) definem o processo de estabilização do lodo como “a transformação parcial do lodo por agentes químicos, físicos e biológicos, de modo que a maior parte putrescível deste é volatilizada ou tornada inativa, tornando esta fração inerte”. No entanto, mesmos estes autores concordam que existe certa subjetividade em relação ao processo de estabilização do lodo e seu destino final.

A norma estadunidense 40 CFR Part 503 (USEPA, 2007), aponta como parâmetros para avaliar o processo de estabilização do lodo de esgoto: odor, redução de patógenos, redução de sólidos voláteis, toxicidade, taxa de absorção de O₂, atividade

enzimática, DBO, DQO, nitratos, teor de cinzas, pH, alcalinidade, viscosidade, ATP e DNA, valor calorífico, entre outros.

Já para a resolução nº 375/2006 do Conama, o lodo estabilizado é aquele em que a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,7.

Em geral, Aisse et al. (1999, p. 291) definem que o “lodo estável é aquele que possui características que minimizam os riscos à saúde pública e ao meio ambiente, sendo inteiramente ligados à presença de microrganismos patogênicos, de elementos tóxicos e ao grau de putrescibilidade do resíduo”.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa desenvolveu-se sumariamente em 3 (três) etapas. A primeira consistiu na elaboração do projeto de dimensionamento e na implantação do SAC. A segunda etapa consistiu na caracterização quantitativa físico-química e microbiológica dos RFTS a serem dispostos no SAC projetado. Já na terceira etapa foi realizada a disposição dos RFTS e o monitoramento do sistema quanto ao tratamento do lodo acumulado na superfície dos tanques.

4.1 LOCAL DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada nas dependências da Estação de Tratamento de Esgoto Dr. Hélio Seixo de Brito (ETE Goiânia), localizada na cidade de Goiânia, Goiás, em coordenadas geográficas 16°37'55" Sul e 49°15'44" Oeste.

Habitualmente na ETE Goiânia são tratados, além de parte do esgoto doméstico gerado pela cidade, lixiviado de aterro sanitário e os RFTS da região metropolitana.

Os RFTS tratados são coletados *in loco* por empresas particulares (por meio de veículos denominados “caminhões limpa-fossa”) e destinados à ETE Goiânia, com média superior a 50 caminhões diários, com capacidade volumétrica individual variando de 6 m³ a 16 m³.

4.2 SISTEMA DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS (SAC)

Foi construída uma estação experimental para o tratamento de resíduos esgotados de fossas e tanques sépticos, do tipo alagado construído de fluxo subsuperficial vertical descendente. A estação possui dois tanques (Figura 11). Um deles foi plantado com mudas da espécie vegetal Capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) e o outro permaneceu sem vegetação, para servir de controle (testemunha) (Figura 12).

O SAC proposto visa o tratamento de RFTS por meio de sua interação com os componentes do sistema (plantas, microrganismos e substrato). Já o sistema controle é destinado a oferecer a comparação entre a presença e ausência das plantas no processo, destacando sua influência no tratamento.



Figura 11 Vista geral da estação experimental de tratamento de resíduos de fossas e tanques sépticos do tipo alagados construídos.

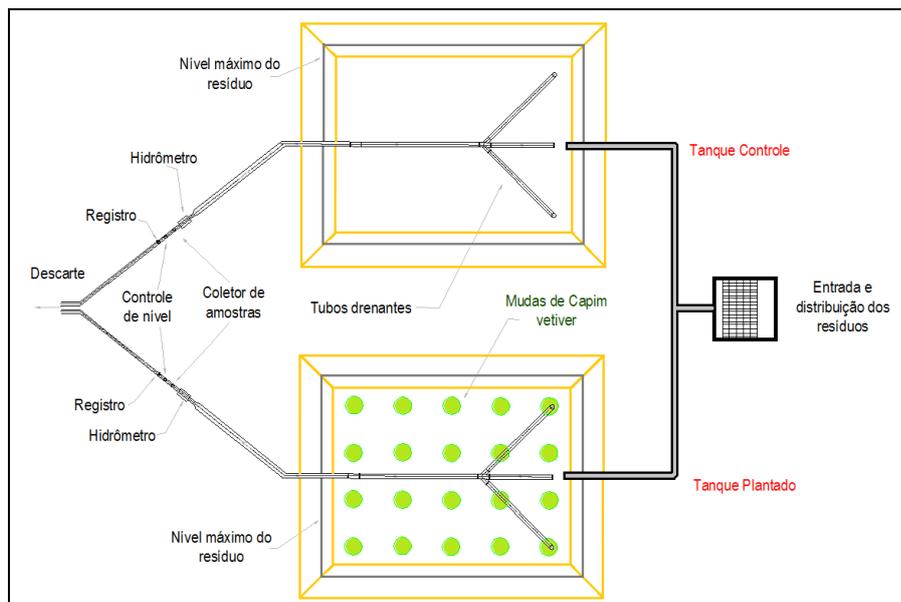


Figura 12 Planta representativa do sistema de alagados construídos implantado (sem escala).

4.2.1 TANQUES, SISTEMA DE DRENAGEM E SUBSTRATOS

Os tanques foram escavados no solo, impermeabilizados com manta plástica, receberam sistemas de drenagem de lixiviado e gases, foram preenchidos por camadas sobrepostas de substrato e um deles, doravante denominado SAC, foi plantado (Figura 13).

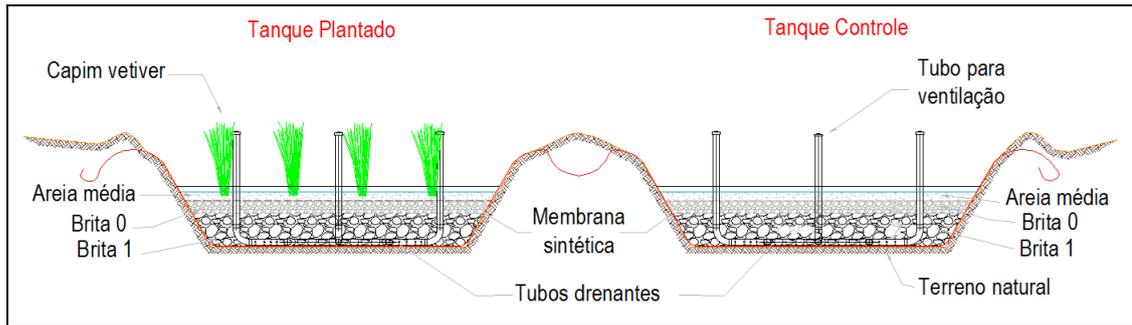


Figura 13 Corte transversal representativo da estação experimental implantada.

Cada tanque possui formato de tronco de pirâmide invertida com dimensões de 3,0 m x 4,0 m de base inferior, 4,15 m x 5,15 m de base superior e 1,20 m de profundidade total. A inclinação do talude foi de 60°.

Para garantir a estanqueidade dos tanques foi implantada uma manta dupla de PVC, de 200 micra de espessura, em quatro camadas sobrepostas (Figura 14). As bordas da manta foram presas diretamente no terreno utilizando-se grampos metálicos.



Figura 14 Imagem parcial do sistema de impermeabilização dos tanques e do sistema de drenagem de gases e lixiviado.

No fundo dos tanques foram instalados sistemas conjugados de drenagem de lixiviado e gases, com tubulação de ventilação nas extremidades. Foram utilizados tubos de esgoto em PVC, de 75 mm de diâmetro, com 1% de declividade, perfuradas longitudinalmente com três linhas de furos de 10 mm.

Os tubos foram dispostos na configuração espinha de peixe com a função de drenar toda a fração líquida lixiviada ao fundo dos tanques. A tubulação de ventilação das extremidades possui a função de permitir trocas gasosas com a atmosfera.

O preenchimento dos tanques se deu com camadas sobrepostas de substratos. Do fundo para a superfície foram utilizados 40 cm de brita #1, 15 cm de brita #0 e 10 cm de areia média (Figura 15), totalizando 65 cm de meio suporte. Acima da superfície dos leitos de tratamento foi deixada uma borda livre de 55 cm, destinada a armazenar os RFTS por ocasião das aplicações, assim como as águas de chuva.



Figura 15 Preenchimento do tanque com camadas superpostas de substrato.

Os substratos (areia e brita) utilizados neste trabalho foram adquiridos em uma loja de material de construção da cidade de Goiânia.

O processo de disposição dos agregados foi manual, utilizando-se de pás, numa altura de queda de 1,50 m.

A configuração final do sistema, sem o plantio das mudas, é apresentada na Figura 16.

Foi construída uma barreira com sacos preenchidos com solo ao redor dos tanques, com vistas a evitar que águas pluviais escoadas pelo terreno neles adentrassem (Figura 17).



Figura 16 Vista geral do sistema após o preenchimento com substrato.



Figura 17 Barreira de sacos com terra destinados à contenção das águas de escoamento superficial do terreno externo.

4.2.2 SISTEMA DE RECEPÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS RFTS

Para recepção dos RFTS esgotados dos caminhões “limpa-fossa” utilizou-se uma caixa de polipropileno posicionada em cota superior à dos tanques. Já para a distribuição igualitária do resíduo em ambos os sistemas, implantou-se uma tubulação de aplicação, com

bipartição (Figura 18). Tomou-se cuidado para que a distribuição de vazão fosse realizada de maneira igualitária, para ambos os tanques. Para tal, o nivelamento da caixa e dos tubos foi feito de maneira minuciosa.



Figura 18 Imagem geral do sistema de distribuição dos resíduos em ambos os tanques.

A caixa receptora é de polipropileno, envolta por uma estrutura metálica de suporte e proteção, com dimensões de 1 m x 1 m de base e 0,9 m de altura. Esta não possui a função de armazenar o resíduo, mas apenas recepcioná-lo para posterior distribuição nos tanques, não correndo riscos de transbordo.

A partir da caixa receptora foi acoplada uma tubulação de PVC de 125 mm de diâmetro. Desta foi realizada a bipartição (utilizando-se um T) em duas tubulações de 100 mm, uma para cada tanque. As tubulações de distribuição foram dimensionadas para dividir a vazão entre os tanques sem deixar transbordar o resíduo na caixa de recepção.

No interior da caixa de recepção foi implantada uma grade inclinada (Figura 19), com aberturas de 2 cm x 2 cm, com a finalidade de retenção de sólidos grosseiros presentes no resíduo, fundamental para evitar o entupimento dos tubos e a disposição de materiais indesejáveis nos tanques.

Sobre a superfície do leito dos tanques, no local de queda do resíduo, foi posicionado um anteparo (bloco de concreto) para dissipar sua energia cinética e evitar a

erosão do substrato e o revolvimento do material ou mesmo a criação de caminho preferencial de escoamento, por ocasião da descarga do resíduo.



Figura 19 Imagem da caixa receptora dos RFTS e da grade para retenção dos sólidos grosseiros.

4.2.3 SISTEMA DE CONTROLE DE NÍVEL INTERNO DOS RESÍDUOS EM TRATAMENTO

O nível da fração líquida dos resíduos no interior do substrato foi controlado por meio de duas tubulações verticais de descarga (uma para cada tanque), implantadas na saída da tubulação de drenagem de fundo, antes do registro (Figura 20). O controle do nível foi feito mediante o posicionamento da extremidade superior do tubo vertical num nível 10 cm abaixo da superfície da camada de areia. Pelo princípio dos vasos comunicantes, o nível interno dos tanques era o mesmo dos tubos de controle, por onde extravasava algum líquido excedente. Antes dos tubos de controle, foram instalados uma torneira, para coleta de amostras do líquido tratado nos leitos e um hidrômetro, para medir o volume extravasado (esta medida foi utilizada no cálculo da evapotranspiração) (Figura 21).

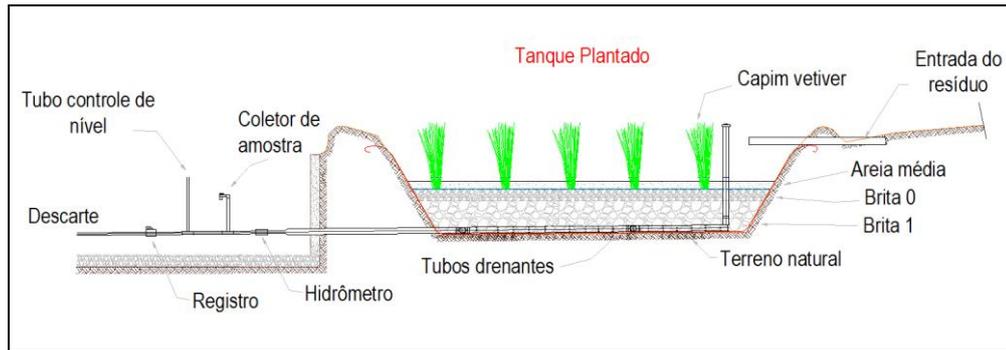


Figura 20 Corte longitudinal representativo do sistema hidráulico da estação experimental de tratamento de resíduos esgotados de fossas e tanques sépticos.

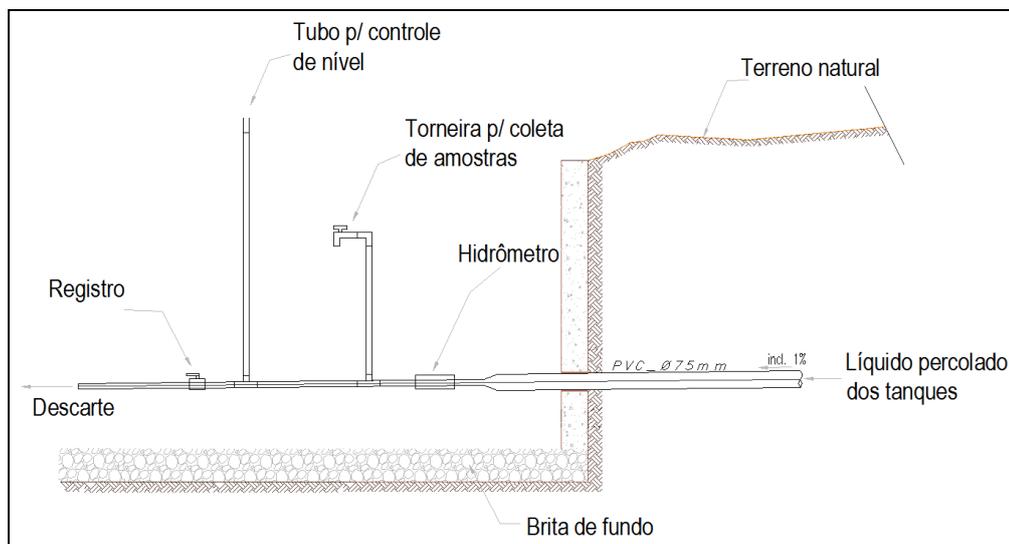


Figura 21 Dispositivos de controle de nível interno de líquidos e de coleta de amostras do efluente tratado, hidrômetro de medição do volume drenado e registro de saída de um dos tanques de tratamento.

4.2.4 PLANTIO DA ESPÉCIE VEGETAL

A escolha da espécie vegetal Capim Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) deu-se em função de sua resistência a pragas, doenças, déficit hídrico, geadas e fogo. Possui capacidade de adaptação a diversos ambientes, sejam eles secos ou encharcados, quentes ou frios e é tolerante a valores extremos de pH, salinidade, toxicidade e baixos índices de nutrientes no solo (TRUONG, 1999).

As mudas foram produzidas a partir da divisão de uma touceira, existente na Estação de Pesquisas em Tratamento de Esgoto com Plantas – EPTEP, da Universidade Federal de Goiás, e plantio em sacolas plásticas, próprias de viveiro, de um litro de capacidade volumétrica. Posteriormente, as mudas foram transplantadas para sacolas plásticas

de 10 L de capacidade, preenchidas com solo local (latossolo vermelho escuro), onde permaneceram até atingirem 1,5 m de altura.

O plantio das mudas no SAC foi realizado cerca de um mês após a implantação do substrato nos leitos de tratamento. Foram plantadas 20 mudas com espaçamento aproximado de 60 cm entre as touceiras e covas com 20 cm de profundidade (atingindo o substrato brita #0), o que correspondeu ao tamanho médio das raízes das plantas nos sacos plásticos.

Considerando o diâmetro médio de 25 cm de cada sacola com muda e a área do SAC, a densidade superficial plantada foi de 1 planta/m² ou 0,050 m² plantado/m² de leito de tratamento.

As mudas tiveram sua parte aérea podada com 40 cm de comprimento e foram plantadas no substrato previamente umedecido, após a remoção da sacola plástica.

A configuração do SAC, após o plantio das mudas é apresentada na Figura 22.



Figura 22 Vista do tanque de tratamento com as mudas de Capim Vetiver plantadas e já em fase de brotação.

4.2.5 BALANÇO HÍDRICO DO SISTEMA

Procedeu-se à determinação do balanço hídrico do sistema, para cada tanque, no intuito de avaliar a capacidade de retenção e absorção de líquidos. Para tanto, foram realizados procedimentos de medição dos volumes de entrada e saída dos tanques.

Os volumes afluentes aos sistemas foram estimados mediante a pesagem dos caminhões, antes e após o processo de descarga. Com isso, obteve-se o valor da massa

esgotada. Coletaram-se amostras do RFTS para avaliação da sua massa específica e posterior cálculo do volume de entrada. A precipitação pluviométrica (outra contribuição afluyente) foi medida por um pluviômetro, instalado ao lado dos tanques de tratamento. Com base nos dados de precipitação e da área superficial de cada tanque, calcularam-se os volumes de contribuição de água da chuva para os tanques.

Os volumes efluentes aos sistemas foram medidos pelos hidrômetros (Figura 23) instalados na saída de cada tanque. Foram utilizados hidrômetros padrão tipo B ($7,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), que mediam tanto o líquido drenado por ocasião do esgotamento dos tanques, quanto o líquido extravasado pela tubulação de controle de nível.



Figura 23 Hidrômetros implantados nas descargas de fundo dos tanques para aferir os volumes drenados.

4.3 AMOSTRAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO RFTS

Visando caracterizar os RFTS aplicados nos sistemas em estudo, foi realizada a amostragem do resíduo bruto para análise laboratorial.

A amostragem foi realizada de maneira composta coletando-se, diretamente na tubulação de disposição do resíduo em um dos tanques (escolhido aleatoriamente), cerca de 2,0 litros a cada 1 minuto, durante o processo de descarga (Figura 24).

As coletas foram unificadas e homogêneas em um recipiente de 20 litros de capacidade. Deste, foram coletados cerca de 3 litros para realização das análises laboratoriais.



Figura 24 Procedimento de amostragem do resíduo no ato da sua disposição no SAC.

As amostras foram preservadas em ambiente refrigerado (caixa de isopor com gelo) e destinadas ao laboratório para caracterização físico-química e microbiológica.

Os procedimentos de coleta e preservação das amostras obedeceram ao estabelecido por Cetesb (2011).

Posteriormente à coleta e transporte das amostras, procedeu-se a realização das análises físico-químicas e microbiológicas. Foram avaliados o pH, umidade, sólidos totais, voláteis e fixos, fósforo total, nitrogênio Kjeldhal total, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato. Já os parâmetros microbiológicos analisados foram *Salmonella* spp., ovos viáveis de helmintos, coliformes totais e *Escherichia coli*.

Os métodos analíticos utilizados na caracterização do RFTS são apresentados no Quadro 7.

Para cada parâmetro, foram realizadas análises em duplicada, com exceção do pH.

Quadro 7 Parâmetros analisados, número de amostras e métodos analíticos utilizados na caracterização dos Resíduos de Fossas e Tanques Sépticos submetidos a tratamento no sistema experimental avaliado.

PARÂMETRO	QUANTIDADE DE AMOSTRAS	MÉTODO ANALÍTICO	REFERÊNCIA
pH	13	SMWW 4500	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Umidade	13	SMWW 2540	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Sólidos totais	13	SMWW 2540	APHA; AWWA; WPCF (2005)

Sólidos fixos	13	SMWW 2540	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Sólidos voláteis	13	SMWW 2540	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Fósforo total	12	SMWW 4500	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Nitrogênio Kjeldahl total	12	SMWW 4500	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Nitrogênio Orgânico	12	SMWW 4500	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Nitrogênio amoniacal	12	SMWW 4500	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Nitrito	12	SMWW 4500	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Nitrato	12	SMWW 4500	APHA; AWWA; WPCF (2005)
<i>Salmonella</i> spp.	12	SMWW 9260	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Coliformes totais	12	SMWW 9222	APHA; AWWA; WPCF (2005)
<i>Escherichia coli</i>	12	SMWW 9222	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Ovos viáveis de helmintos	5	Yanko (1987) adaptado	Yanko (1987)

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Após a realização das análises físico-químicas e microbiológicas dos RFTS, os dados coletados foram avaliados estatisticamente para melhor representação dos resultados.

Submeteram-se os dados à análise estatística básica (estatística descritiva), obtendo-se valores de média, mediana, valores máximos e mínimos, desvio padrão e variância. Estes parâmetros foram calculados mediante utilização do software EXCEL 2010.

Para verificar a normalidade dos dados, objetivando-se melhor entendimento sobre as características dos RFTS, foram realizados os testes estatísticos específicos de Kalmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk's, com nível de significância de 0,05, utilizando-se do software ORIGIN 8.0. Ambos os testes são os mais utilizados para verificação da normalidade dos dados (ARANGO, 2012). Além disso, também com o ORIGIN 8.0 foram inseridos e plotados os gráficos “Box plot” para avaliação da dispersão dos resultados das análises.

4.5 DISPOSIÇÃO DO RFTS NOS TANQUES DE TRATAMENTO

Após o plantio, os tanques de tratamento foram monitorados por um período de dois meses para realização de testes de estanqueidade, adaptação das plantas e realização de ajustes técnicos. Somente após isso se deu início à aplicação dos RFTS.

Os RFTS foram dispostos através do escoamento por gravidade do tanque do caminhão “limpa-fossa” para a caixa de recepção (Figura 25) e posteriormente distribuído aos tanques (Figura 26).



Figura 25 Procedimento de descarga do RFTS na caixa de recepção do sistema experimental de tratamento.



Figura 26 Distribuição igualitária dos resíduos nos tanques de tratamento.

Dentro dos tanques, o resíduo caía em um bloco de concreto, tendo sua energia dissipada, se espalhava pela superfície e infiltrava lentamente. O material sólido era filtrado e se acumulava na superfície dos leitos a cada aplicação. A parte líquida percolava preenchendo os espaços vazios do substrato, até atingir o nível de controle. Se houvesse excedente, este seria drenado pelo tubo de controle de nível.

A aplicação dos resíduos se deu em bateladas, aplicando-se, em média, 3,3 m³ de RFTS por tanque, semanalmente. Estas se iniciaram no final do mês de março e cessaram ao final do mês de junho, época de transição entre o período chuvoso e de estiagem na região.

Após seis dias da aplicação, procedia-se ao esvaziamento dos leitos de tratamento, mediante abertura dos registros. Assim, o tempo de detenção hidráulica (TDH) foi de 6 dias. Os líquidos eram totalmente drenados e seus volumes medidos pelos hidrômetros. No dia seguinte era realizada nova aplicação. O ciclo se repetiu por um período de 98 dias consecutivos, totalizando 14 aplicações.

Devido à elevada variabilidade das características do RFTS (principalmente no teor de sólidos) e dos variados volumes dos caminhões “limpa-fossa”, não foi possível estabelecer uma taxa fixa de aplicação. Assim, realizava-se a aplicação e coletavam-se amostras do resíduo aplicado para posterior determinação do teor de sólidos, que junto com o volume calculado permitia a determinação da taxa de cada aplicação. A taxa média de aplicação de sólidos foi de 34,36 kg ST m².ano⁻¹, com taxa volumétrica média de 0,165 m³.m².semana⁻¹.

4.6 AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DO LODO ACUMULADO

Após a disposição dos RFTS no sistema, a fração líquida deste percolava pelo substrato e a fração sólida ficava retida na superfície do substrato, acumulando-se ao longo das aplicações. Esta fração sólida acumulada denominou-se de lodo e é o alvo de estudo deste trabalho.

Com o acúmulo de lodo na superfície de ambos os tanques, o processo de tratamento pelo SAC (tanque plantado) e pelo sistema controle (testemunha) foi monitorado e avaliado ao longo do tempo.

A taxa de acúmulo de sólidos na superfície de cada tanque foi medida semanalmente, utilizando-se de uma régua graduada (Figura 27). Foi calculada a média aritmética de 10 medições em cada tanque, realizadas de maneira aleatória antes de cada nova aplicação do resíduo.

Foram coletadas amostras do lodo de ambos os tanques para posteriores análises físico-químicas e microbiológicas. Analisaram-se em laboratório os parâmetros umidade, sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis, coliformes totais, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. e ovos viáveis de helmintos.



Figura 27 Medição da espessura da camada de lodo acumulada na superfície do SAC.

Cada amostra levada ao laboratório foi constituída por cinco sub-amostras coletadas de maneira aleatória (em ziguezague). Para isso, as sub-amostras foram unificadas e homogeneizadas em seus respectivos recipientes (sacos de polietileno), lacrados, etiquetados e enviados ao laboratório. O intervalo entre as coletas foi de três semanas durante o período de aplicação.

Depois de cessadas as aplicações, os parâmetros foram avaliados por cerca de dois meses (julho e agosto), com intervalo de coletas de cerca de um mês.

Foram realizadas coletas do lodo, em ambos os tanques, durante as 9^a e 13^a semanas, época que os tanques ainda estavam sendo submetido ao processo de disposição de novas cargas de RFTS. Além disso, nas 16^a e 19^a semanas o lodo também foi caracterizado sem que houvesse novas contribuições de RFTS, uma vez que a última aplicação foi na 13^a.

A água retida na camada superficial de cada tanque foi calculada mediante análise do teor de umidade do lodo acumulado utilizando-se o método proposto pela Embrapa (1997). Já as demais análises foram realizadas segundo seus respectivos métodos apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 Parâmetros analisados, número de amostras e métodos analíticos empregados na caracterização do lodo.

PARÂMETRO	QUANTIDADE DE AMOSTRAS	MÉTODO ANALÍTICO	REFERÊNCIA
Sólidos totais	04	SMWW 2540	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Sólidos fixos	04	SMWW 2540	APHA; AWWA; WPCF (2005)

Sólidos voláteis	04	SMWW 2540	APHA; AWWA; WPCF (2005)
<i>Salmonella</i> spp.	02	SMWW 9260	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Coliformes totais	04	SMWW 9222	APHA; AWWA; WPCF (2005)
<i>Escherichia coli</i>	04	SMWW 9222	APHA; AWWA; WPCF (2005)
Ovos viáveis de helmintos	03	Yanko (1987) adaptado	Yanko (1987)

As análises físico-químicas e biológicas, tanto da caracterização dos RFTS como do lodo em tratamento, foram realizadas no Laboratório de Saneamento da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG), na Saneamento de Goiás S/A (SANEAGO) e por um laboratório particular com certificação de qualidade.

Para avaliar o tratamento do lodo do sistema experimental, dando enfoque para os processos de higienização (redução ou eliminação de patógenos) e estabilização (mineralização), e visando posterior uso agrícola, foi realizada a comparação entre os valores dos parâmetros analisados nesta pesquisa com aqueles estabelecidos pela resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente nº 375/2006 (CONAMA, 2006).

A resolução Conama nº375/2006 estabelece como um dos parâmetros a concentração de coliformes termotolerantes como referência para enquadramento do lodo. Entretanto, nesta pesquisa analisou-se a concentração de coliformes totais, que são mais abrangentes e incluem o grupo dos termotolerantes. Além disso, foi avaliada a presença e concentração da bactéria *Escherichia coli*, que não é contemplada pela resolução. Também, esta mesma norma exige a análise de vírus entéricos para classificação do lodo na classe A. Entretanto, nesta pesquisa não foi analisada a presença de vírus.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização dos RFTS afluentes ao sistema experimental de tratamento resultou em valores típicos, conforme descritos na literatura, com destaque para a elevada variabilidade e falta de normalidade dos dados de alguns atributos (Tabela 1).

Tabela 1 Caracterização do resíduo bruto afluente ao sistema experimental de tratamento.

Atributo	Máximo	Mínimo	Média	Mediana
pH	8,40	7,38	7,76	7,50
Umidade (%)	99,99	94,85	99,05	99,75
Fósforo total (mg.L ⁻¹)	20,70	0,20	6,76	0,90
Nitrogênio total (mg.L ⁻¹)	727,11	49,72	304,22	220,03
Nitrogênio orgânico (mg.L ⁻¹)	649,60	3,30	220,00	113,55
Nitrogênio amoniacal (mg.L ⁻¹)	274,40	37,80	108,08	99,40
Nitrito (mg.L ⁻¹)	1,20	0,01	0,21	0,10
Nitrato (mg.L ⁻¹)	48,00	3,31	19,72	15,50
Sólidos totais (mg.L ⁻¹)	26.320,00	488,00	5.635,73	2.471,00
Sólidos fixos (mg.L ⁻¹)	12.171,00	136,00	2.481,00	924,00
Sólidos voláteis (mg.L ⁻¹)	21.782,00	352,00	4.662,73	1.646,00
Coliformes totais (NMP 100 mL ⁻¹)	1,64E+08	3,27E+06	4,64E+07	1,25E+07
<i>Escherichia coli</i> (NMP 100 mL ⁻¹)	7,50E+07	3,23E+05	1,48E+07	5,20E+06
<i>Salmonella</i> spp.	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Ovos viáveis de helmintos (ovos.g ⁻¹)	1,80	0,00	0,75	0,60

Os valores de umidade e pH sempre apresentaram resultados pouco variáveis, tendo a média e mediana valores próximos. Os resultados para análise de *Salmonella* spp. sempre indicaram a ausência deste gênero de bactérias nos RFTS em estudo. Já os valores dos demais atributos apresentaram variações conforme o resíduo coletado.

As Figuras de 28 a 39 apresentam a distribuição dos resultados das análises laboratoriais, em diagramas de caixa.

Segundo os testes de normalidade aplicados, constatou-se que os dados de nitrogênio total, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrato e ovos viáveis de helmintos apresentaram distribuição normal, para o nível de significância de 0,05. Para os dados de fósforo total, nitrito, sólidos totais, sólidos voláteis, coliformes totais e *Escherichia coli*, a distribuição foi normal para o teste de Kalmogorov-Smirnov e anormal para o de

Shapiro-Wilk's. Apenas os valores de sólidos fixos é que apresentaram não-normalidade em sua distribuição para ambos os testes.

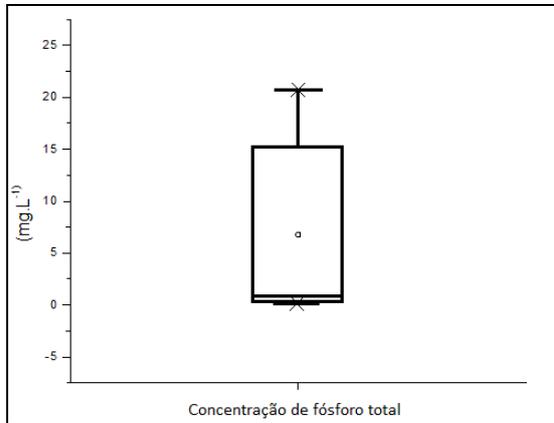


Figura 28 Diagrama em caixa da concentração de fósforo total.

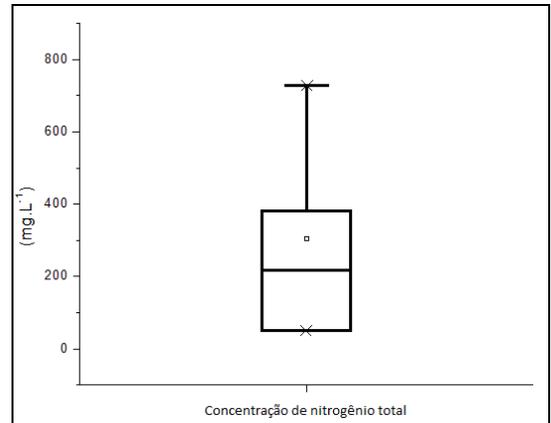


Figura 29 Diagrama em caixa da concentração de nitrogênio total.

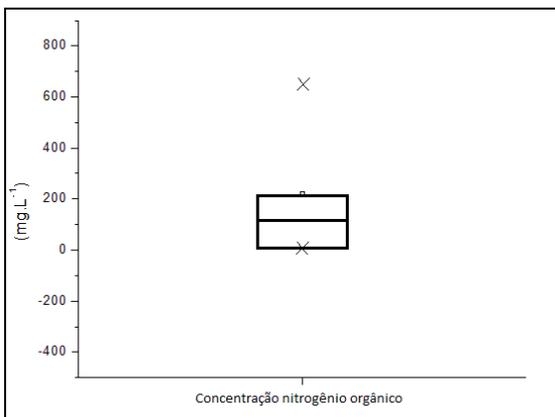


Figura 30 Diagrama em caixa da concentração de nitrogênio orgânico.

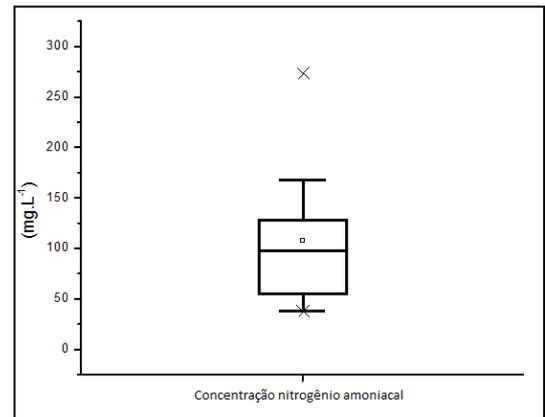


Figura 31 Diagrama em caixa da concentração de nitrogênio amoniacal.

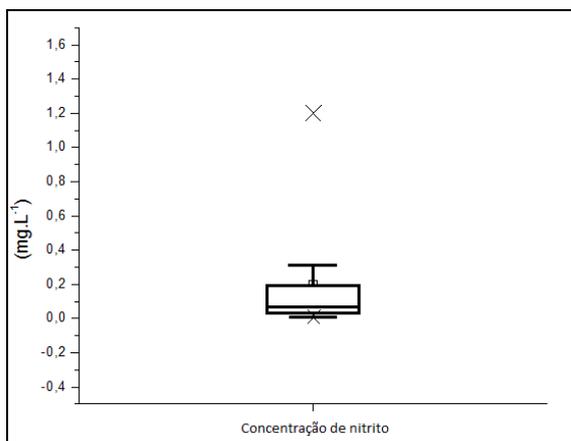


Figura 32 Diagrama em caixa da concentração de nitrito.

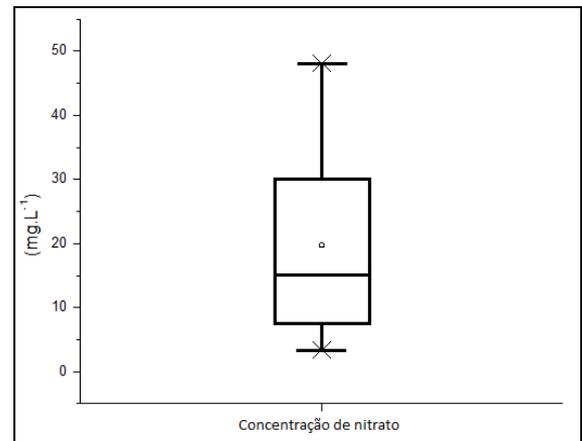


Figura 33 Diagrama em caixa da concentração de nitrato.

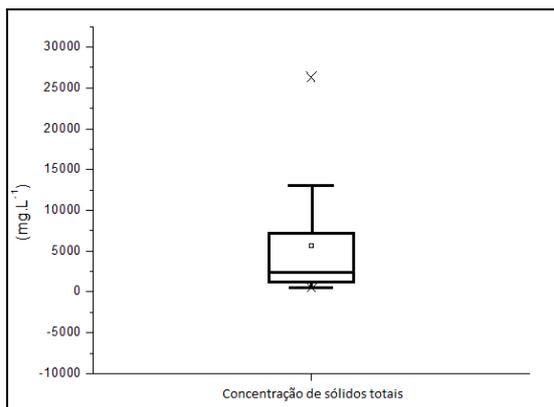


Figura 34 Diagrama em caixa da concentração de sólidos totais.

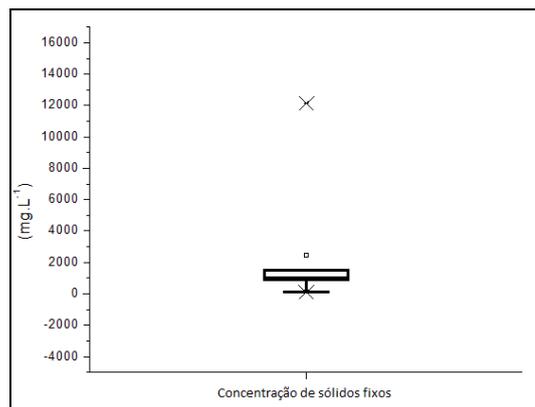


Figura 35 Diagrama em caixa da concentração de sólidos fixos.

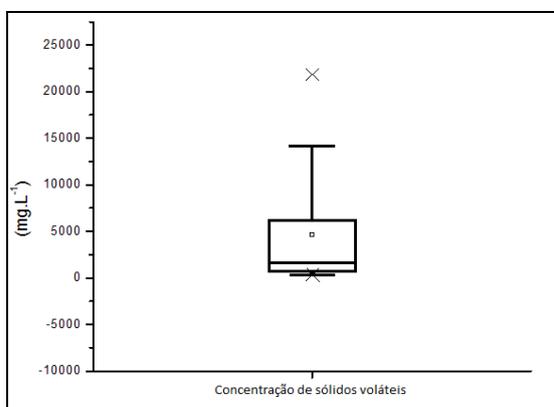


Figura 36 Diagrama em caixa da concentração de sólidos voláteis.

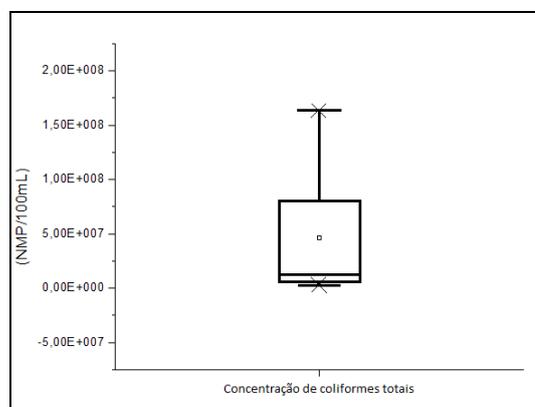


Figura 37 Diagrama em caixa da concentração de coliformes totais.

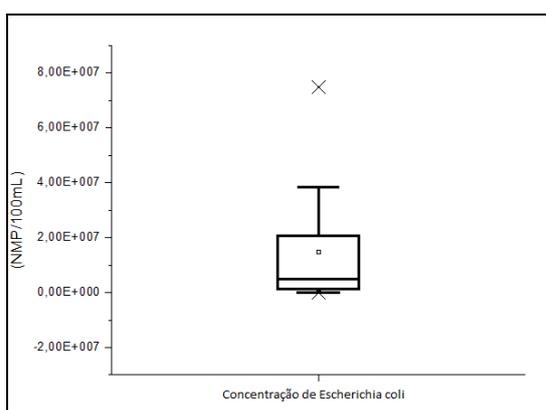


Figura 38 Diagrama em caixa da concentração de *Escherichia coli*.

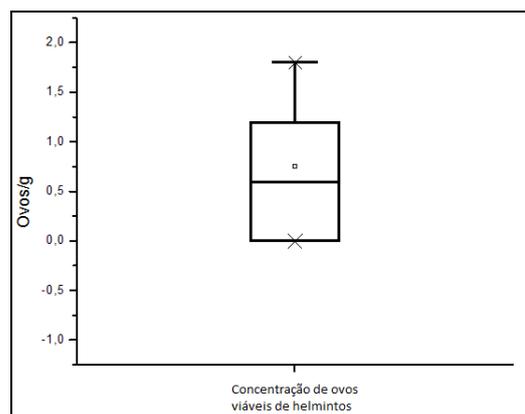


Figura 39 Diagrama em caixa da concentração de ovos viáveis de helmintos.

De forma geral, a avaliação da normalidade dos dados foi limitada em virtude da pouca quantidade de amostras coletadas. O ideal e mais adequado é que a população analisada seja superior a 100 (ARANGO, 2012). Entretanto, os resultados apresentados não devem ser ignorados.

A variabilidade da maioria dos atributos analisados se dá devido às condições em que o RFTS é gerado, tais como: clima local, nível socioeconômico da população, tipo de SITDE, período de limpeza do SITDE, origem do esgoto (doméstico ou industrial), entre outros fatores (ANDREOLI e POMPEO, 2009; RIOS, 2010). Além disso, soma-se ainda o fato de que os caminhões limpa-fossa geralmente esgotam mais de um SITDE com RFTS de origens e composições diferentes.

Independentemente da variação dos dados, os RFTS apresentaram elevados teores nutricionais na maioria das amostras e o lodo acumulado em ambos os sistemas manteve esta característica. Destacaram-se os teores de fósforo total, nitrogênio total, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato, cujos valores foram na maioria das vezes superiores aos valores típicos encontrados no esgoto sanitário (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

O uso agrícola do lodo estará condicionado ao atendimento das normas legais e às necessidades nutricionais da cultura. O primeiro aspecto será discutido posteriormente.

Não foi possível estabelecer e aplicar uma taxa constante de sólidos ou de volume nos tanques, uma vez que tanto a quantidade de sólidos totais (ST) como a de volume contido nos caminhões é bastante variável, sendo o primeiro somente conhecido mediante análise laboratorial.

A Figura 40 apresenta o gráfico da taxa de aplicação de sólidos dos RFTS, em $\text{kg ST/m}^2\cdot\text{ano}^{-1}$, das aplicações realizadas.

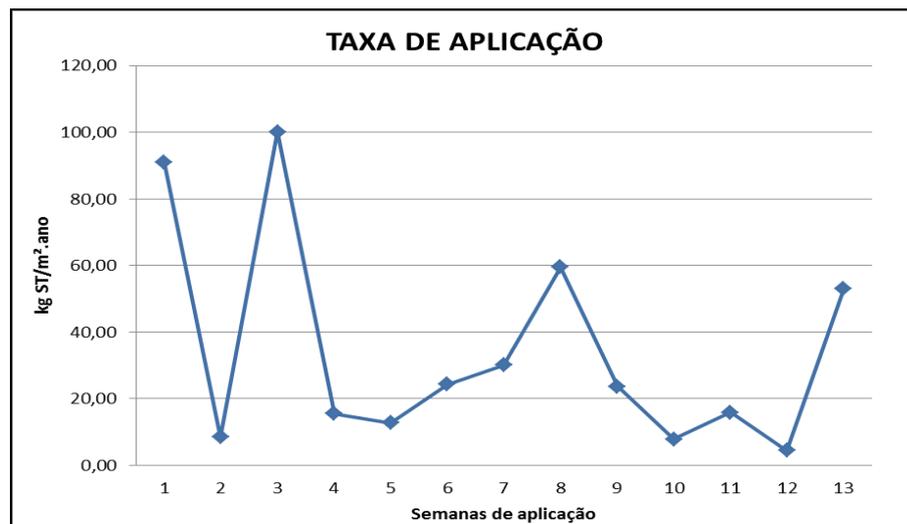


Figura 40 Gráfico representativo da taxa de aplicação de sólidos dos RFTS no sistema experimental de tratamento.

Durante as primeiras aplicações dos RFTS em ambos os sistemas, verificou-se sua rápida infiltração. Até a quarta semana, o tempo médio para total infiltração variou de duas a três horas, conforme o volume e teor de sólidos aplicados. Com o passar do tempo e realização de novas aplicações, a velocidade de infiltração diminuiu nos dois tanques, principalmente no SAC. Nas quatro últimas semanas, observou-se que no SAC a fração líquida demorou até seis dias para total infiltração. Entretanto, isso dependeu muito das condições meteorológicas da semana. Neste mesmo período, o líquido no tanque controle infiltrou totalmente em um dia.

A redução da capacidade de infiltração e posterior retenção de umidade é característica do tipo de resíduo utilizado. Resultados similares foram encontrados por Brasil e Matos (2008) que perceberam redução na percolação da vazão afluente ao sistema em virtude da redução da porosidade do substrato pelo resíduo acumulado.

Com a redução da velocidade de infiltração do resíduo nos leitos, faz-se necessário o correto dimensionamento da altura da borda livre dos tanques para que os RFTS sejam recepcionados totalmente (conforme a demanda diária) e não haja transbordamento. O valor desta altura irá variar em função do volume de aplicação e da espessura da camada de lodo acumulada.

Após a terceira aplicação do RFTS, foi constatada a formação de uma camada de lodo superficial em ambos os tanques (Figura 41). As duas primeiras aplicações foram suficientes apenas para preencher os vazios da camada de areia.



Figura 41 Acúmulo de lodo no SAC (esquerda) e no tanque controle após quatro semanas de aplicações do RFTS.

Ao longo das aplicações, a camada superficial de lodo aumentou (Figura 42), em ambos os tanques, em função da alta concentração de sólidos aplicada e da retenção de umidade pelo sistema.

O acúmulo médio de lodo no SAC foi de 1,1 cm ao mês, o que corresponderia a pouco mais de 13 cm acumulados no período de um ano. Estes valores médios devem ser considerados no dimensionamento do sistema, principalmente na altura da borda livre do tanque, que levará em questão o horizonte de projeto adotado. Como exemplo, uma borda livre de 1,3 m (além daquela reservada ao volume de aplicação dos resíduos) permitiria uma vida útil de 10 anos do sistema de tratamento.

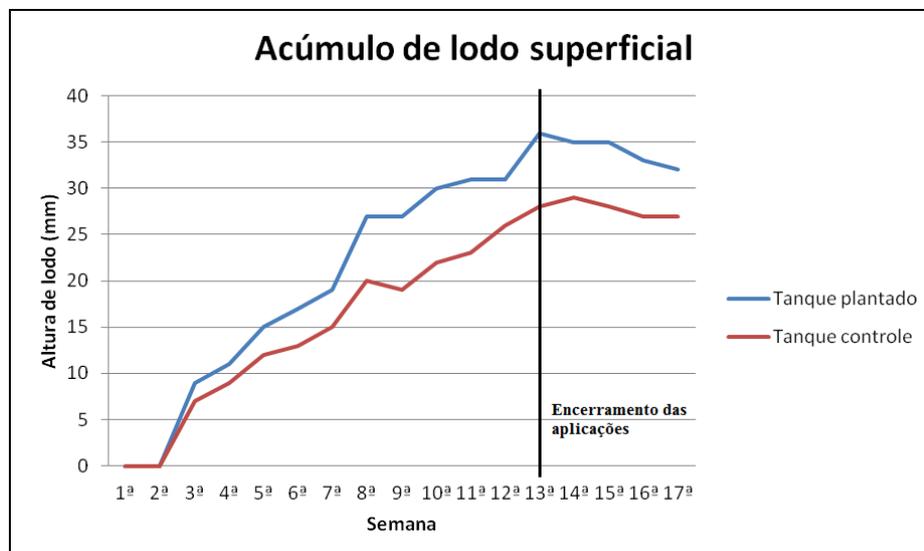


Figura 42 Variação da altura de lodo superficial acumulado ao longo do tempo.

A maior espessura da camada de lodo do tanque plantado em relação ao sistema controle se deu em virtude principalmente da presença da vegetação. Esta proporcionou sombreamento e conseqüentemente menor exposição do lodo à luz do Sol, além ter formado barreira à atuação dos ventos. Assim, a taxa de evaporação no SAC foi menor, favorecendo a retenção de umidade no lodo, que demonstrou maior espessura.

Conforme Sánchez-Carrillo et al. (2001), na maioria dos casos, a radiação solar é responsável por mais de 75% da variação da evapotranspiração, enquanto a umidade relativa e a temperatura são responsáveis pelo restante.

A presença de vegetação favoreceu a retirada de água do sistema pelo processo de transpiração. As plantas absorvem água da rizosfera, pelas raízes e a liberam para a atmosfera, pelas folhas, na forma de vapor d'água (KADLEC e WALLACE, 2009).

A presença das plantas reduziu o volume de líquidos drenados, em comparação ao tanque controle. Por meio dos cálculos de balanço hídrico de ambos os sistemas,

constatou-se que 37,13% do líquido que entrou pelo tanque com plantas foi retido no ambiente ou evapotranspirado e 62,87% esgotado pela tubulação de drenagem. Já o sistema controle apresentou em média 16,60% de retenção/evaporação e 83,40% de líquido drenado.

Em clima semelhante, Pitaluga (2011) verificou taxas de evapotranspiração de 67,7%, 61,6% e 60,6%, para sistemas de tratamento de esgoto sanitário do tipo alagado construído de fluxo subsuperficial horizontal, vegetados com Lírio do Brejo (*Hedychium coronarium*), utilizando como substrato areia lavada, brita #0 e brita #1, respectivamente.

Já Quege (2011), sob o mesmo clima, avaliando a eficiência das espécies de bambu *Guadua angustifolia*, *Phyllostachys bambusoides* e *Phyllostachys aurea*, num sistema de tratamento de esgoto sanitário do tipo alagado construído de fluxo subsuperficial vertical descendente, utilizando solo (Latosolo vermelho escuro) como substrato, verificou taxas de evapotranspiração de 86,0%, 7,2% e 8,1%, respectivamente.

Koottatep et al. (2004b), estudando o tratamento do mesmo tipo de resíduo em SAC's de fluxo vertical descendente, encontraram valores médios para a evapotranspiração em torno de 50% e 45% para o volume drenado. Os demais 5% foram retidos no lodo superficial, reduzindo também a capacidade de infiltração do sistema.

Os valores de evapotranspiração e evaporação, do SAC e tanque controle, respectivamente, foram bastante variáveis em função das condições meteorológicas locais.

Brasil e Matos (2008) encontraram taxas de evapotranspiração variando entre 11% e 27% em um sistema de fluxo subsuperficial horizontal. Já Souza et al. (2004), em clima tropical, verificaram uma taxa de evapotranspiração por volta de 50%. Tais valores se aproximam dos encontrados por Schütte e Fehr (1992) apud Stottmeister et al. (2003) na Europa central, que observaram taxas de 20% a 50%, dependendo da estação do ano.

A diferença dos valores de evapotranspiração nestes trabalhos é significativa, variando em função do substrato e espécie vegetal utilizada, da taxa de aplicação e principalmente do tipo de efluente a ser tratado (KADLEC e WALLACE, 2009).

Segundo Stefanakis et al. (2009) e Vassilios e Tsihrintzis (2011), os valores das taxas de aplicação de sólidos são fatores que influenciam diretamente no desaguamento do lodo. Para o caso dos RFTS, estas taxas ótimas devem ser mais bem estudadas.

Tanto ao longo das aplicações como após o fim destas, o lodo esteve sob ativas interações com o meio, favorecendo sua transformação. As Tabelas 2 e 3 apresentam a caracterização do lodo dos tanques controle e plantado, respectivamente, durante e após o período de aplicação.

Tabela 2 Caracterização do lodo acumulado no tanque controle.

Atributo	9ª Semana	13ª Semana	16ª Semana	19ª Semana
Sólidos totais (% ST/amostra)	32,75	37,63	96,25	95,37
Sólidos fixos (% SF/ST)	35,68	37,67	48,32	52,89
Sólidos voláteis (% SV/ST)	64,32	62,33	51,68	47,11
Ovos viáveis de helmintos (ovos.g ⁻¹ ST)	1,76	0,00	0,00	-
Coliformes totais (NMP.g ⁻¹)	7,28 x 10 ⁵	5,11 x 10 ⁵	1.480,00	885,00
<i>Escherichia coli</i> (NMP.g ⁻¹)	8,31 x 10 ⁴	3,16 x 10 ⁴	82,00	72,00
<i>Salmonella</i> spp.	Ausente	Ausente	-	-
Umidade (%)	64,70	62,37	3,75	4,63

Nota: As aplicações encerraram-se na 13ª semana.

Tabela 3 Caracterização do lodo acumulado no tanque plantado.

Atributo	9ª Semana	13ª Semana	16ª Semana	19ª Semana
Sólidos totais (% ST/amostra)	24,62	11,95	91,35	92,21
Sólidos fixos (% SF/ST)	32,48	34,25	57,36	67,15
Sólidos voláteis (% SV/ST)	67,52	65,75	42,64	32,85
Ovos viáveis de helmintos (ovos. g ⁻¹ ST)	4,70	0,00	0,00	-
Coliformes totais (NMP.g ⁻¹)	3,57 x 10 ⁶	9,94 x 10 ⁵	2.200,00	980,00
<i>Escherichia coli</i> (NMP.g ⁻¹)	4,69 x 10 ⁵	8,30 x 10 ⁴	122,00	102,00
<i>Salmonella</i> spp.	Ausente	Ausente	-	-
Umidade (%)	80,32	88,05	8,65	7,79

Nota: As aplicações encerraram-se na 13ª semana.

Conforme citado anteriormente, durante as aplicações a umidade da camada de lodo no SAC sempre aumentou, ao contrário do tanque controle que variou principalmente em função das condições climáticas locais (precipitação, exposição solar, ventos, etc.).

No tanque plantado obteve-se valor máximo de umidade do lodo de 88%, em comparação ao pico de 65% do lodo do tanque controle.

Notória foi a drástica redução da umidade do lodo de ambos os tanques cerca de três meses após a última aplicação. Destaca-se que neste período não houve precipitações consideráveis, fator que contribuiu para esta redução significativa.

Referente ao processo de estabilização exigido pela resolução nº375/2006 do Conama, cerca de 69% das amostras de RFTS aplicadas nos tanques apresentaram relação de sólidos voláteis/sólidos totais menores que 0,7. Neste sentido, segundo a norma, 31% das amostras aplicadas não se adequaram ao critério estabelecido para estabilização.

Durante as aplicações, a relação de sólidos voláteis e totais do lodo ficou próxima a 70% para ambos os sistemas, com valores ligeiramente superiores para o SAC. Ao fim das aplicações, observou-se notória redução desta relação, principalmente no tanque plantado que

apresentou resultados de 42,64% na 16ª semana e 32,85% na 19ª semana. Já no sistema controle os valores foram de 51,68% e 47,11%, respectivamente para as mesmas semanas.

Com estes dados, destaca-se a maior eficiência do SAC na degradação da matéria orgânica e estabilização do lodo. Fatores como a maior atividade biológica, proporcionada pelo ambiente com a presença de plantas, explicam sua melhor eficiência.

Segundo Bianchi et al. (2011), os fatores atuantes no processo de estabilização (desidrogenase, taxa de respiração, condições redox, entre outros) proporcionados pela presença das plantas permitem a aplicação de altas taxas de carga orgânica, além da operação dos sistemas em diversas condições climáticas, sem o comprometimento da eficiência do sistema.

Ao passo que em ambos os sistemas a concentração de sólidos voláteis diminuía, a de sólidos fixos aumentava, favorecida pelo processo de mineralização do lodo, principalmente na presença das plantas. Dentro deste processo, estima-se que parte da matéria presente no lodo foi mineralizada por fenômenos como a nitrificação, que transforma o nitrogênio orgânico em inorgânico, favorecendo ainda mais o uso agrícola do lodo.

Outra característica associada ao processo de estabilização observada foi a ausência de vetores ou odores desagradáveis proveniente do lodo, mesmo que estas não tenham sido avaliadas cientificamente.

Os parâmetros mais importantes referentes ao gerenciamento do lodo de sistemas de esgotamento sanitário são certamente os microbiológicos, até porque se estima que a presença de compostos orgânicos ou inorgânicos tóxicos seja insignificante.

Na caracterização do RFTS destacaram-se as elevadas concentrações de coliformes totais e *Escherichia coli*, além da presença de pequenas quantidades de ovos viáveis de helmintos em certas amostras. Em nenhuma amostra analisada foi encontrada a presença de bactérias do gênero *Salmonella* spp.

Da mesma forma, na caracterização do lodo realizada na 9ª semana, observaram-se altos valores de coliformes totais e *Escherichia coli*, baixas quantidades de ovos viáveis de helmintos e ausência de *Salmonella* spp., para ambos os tanques. Entretanto, os valores do lodo do tanque controle foram menores do que o SAC, ao passo que nesta semana se enquadrava na classe B, conforme a resolução do Conama.

Na 13ª semana, o lodo de ambos os tanques se enquadraram como tipo B, com destaque ainda para as altas concentrações de coliformes totais e *Escherichia coli*, e para a ausência de ovos viáveis de helmintos e *Salmonella* spp., em ambos os tanques. Novamente as concentrações de microrganismos no tanque controle foram menores do que no sistema com plantas.

A influência da radiação solar direta apresenta-se como um dos principais fatores contribuintes para redução de organismos patógenos. Além disso, as rápidas variações de umidade que ocorreram no tanque controle em relação ao plantado, são fatores que podem explicar tais resultados. Bufaiçal (2010) sugere que o processo de hidratação e desidratação do lodo em tratamento seja responsável pela redução da quantidade de ovos viáveis de helmintos presentes. Entretanto, esta mesma autora não descarta a influência das plantas na liberação de substâncias antibióticas. Existe também a possibilidade de que as plantas possam liberar exsudados radiculares, juntamente à presença dos microrganismos, favorecendo a mobilidade e metabolização dos contaminantes (WU et al., 2012).

Cessada as aplicações, os lodos de ambos os tanques se enquadraram na classe B (coliformes termotolerantes $< 10^6$ NMP g^{-1} ST; ovos viáveis de helmintos < 10 ovos g^{-1} ST). Entretanto, a resolução de referência estabeleceu que decorridos 5 anos a partir da data de sua publicação, somente seria permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado de classe A. Assim, o lodo não poderia ser utilizado imediatamente na agricultura, uma vez que tal prazo já decorreria.

Cerca de um mês após a última aplicação (16ª semana), o lodo de ambos os tanques ainda não se enquadraram no tipo A em virtude da elevada concentração de coliformes totais. Neste período, a concentração de ovos viáveis de helmintos e *Salmonella* spp. já estavam de acordo com o estabelecido pela norma.

Após a 19ª semana, ou cerca de dois meses após a última aplicação, a concentração de coliformes totais dos lodos de ambos os tanques se reduziu a valores menores que 1.000 NMP g^{-1} ST, o que promoveu seus enquadramentos segundo o tipo A. Novamente, as concentrações de patógenos foram menores no tanque controle do que no SAC.

Neste sentido, nos sistemas em estudo, o processo de redução de patógenos para atendimento ao enquadramento do lodo na classe A durou cerca de 2 meses após serem suspensas as aplicações, tempo inferior (mínimo de 3 meses) ao estipulado pela técnica de secagem em leitos de areia ou em bacias, pavimentadas ou não, recomendado pela USEPA (1993).

O uso agrícola do lodo deverá seguir ao determinado pelas normas ambientais vigentes, levando-se em consideração as culturas aptas a serem utilizadas e formas de manejo do solo, bem como as taxas e formas de aplicação.

A importância do tratamento do lodo de RFTS pelo SAC teria menos sentido se não houvesse eficiência deste para a melhoria da qualidade da fase líquida lixiviada pelo sistema.

Em outro trabalho parceiro, destacou-se a elevada eficiência (média de 91%) do SAC na remoção da Demanda Biológica de Oxigênio (DBO) da fase líquida dos RFTS. Esta sempre foi superior a 80% e com concentração final média de lançamento de cerca de 43 mg. L⁻¹. Entretanto, o SAC não foi totalmente eficiente na remoção de nitrogênio amoniacal, estando sempre acima do estabelecido pela legislação ambiental vigente para lançamento em corpo hídrico. No tanque controle, as eficiências foram sempre inferiores e as concentrações de saída sempre maiores para a maioria dos atributos.

Contribui como outro fator positivo para a utilização do SAC (sistema com as plantas) o aspecto estético e ornamental proporcionado pela presença das plantas. Entretanto, após o fim da operação do sistema deve-se suspender a aplicação de RFTS pelo tempo suficiente para o enquadramento do lodo na classe A, mas também, para a morte das plantas. Então, o lodo poderá ser retirado do SAC juntamente com as plantas e ser utilizado na agricultura. De outro lado, é possível que os RFTS tragam consigo contaminantes (a exemplo de metais tóxicos) que não permitiriam o uso do lodo na agricultura. Nesse caso, as plantas poderiam absorver tais elementos e incorporá-los em seus tecidos, o que também permitiria o uso do lodo na agricultura, após a remoção e destinação adequada das plantas.

Apesar de o sistema controle sugerir menor trabalho de manutenção (em virtude da ausência de plantas), destaca-se ocorreu o surgimento e desenvolvimento de espécies vegetais diversas em seu leito de tratamento, fazendo-se necessário sua retirada a cada 15 dias. No SAC não houve este trabalho, uma vez que a presença do Capim Vetiver dificultou o surgimento e desenvolvimento de espécies vegetais indesejadas.

Em termos práticos, o dimensionamento dos SAC's para tratamento dos RFTS deverá adotar um horizonte de projeto de vários anos, levando-se em consideração principalmente a taxa de aplicação volumétrica, uma vez que a de sólidos é bastante difícil de controlar. Baseado no trabalho parceiro citado acima, sugere-se que a taxa de aplicação volumétrica esteja em torno de 0,121 m³.m⁻².semana⁻¹ (121 mm.semana⁻¹) para que a eficiência do tratamento da fase lixiviada seja ótima para a maioria dos atributos analisados.

A retirada do lodo para possível utilização na agricultura deverá ser feita após muitos anos de operação quando esta camada atingir valores altos que impossibilitem a aplicação dos RFTS sem que haja transbordamento.

Durante a realização desta pesquisa, juntamente com o trabalho paralelo, não se observaram significativos impactos do acúmulo de lodo na eficiência de tratamento da fração líquida lixiviada, pois esta sempre foi variável, não em função do aumento da camada de lodo, mas sim das taxas aplicadas.

Também não foram constatados problemas de colmatação do leito de tratamento. A influência do clima local foi fator fundamental, pois propiciou condições adequadas para secagem do lodo e favorecimento da infiltração na maioria dos casos. Entretanto, como grande parte desta pesquisa se desenvolveu no período de estiagem, não se deve descartar a influência climática de outras épocas do ano ou outras regiões, na colmatação e eficiência do SAC, uma vez que com a variação de temperatura, radiação solar e precipitação, fatores como a atividade biológica e taxa de evapotranspiração também são modificados.

6 CONCLUSÕES

Verificou-se elevado potencial nutricional do RFTS bruto, sugerindo a possibilidade de uso agrícola do lodo tratado acumulado. O atendimento aos critérios estabelecidos pela resolução Conama nº 375/2006, para o enquadramento do lodo na classe A, foi alcançado, em ambos os tanques, dois meses após a última aplicação, reforçando a necessidade de uma fase de “descanso” dos leitos para retirada e utilização agrícola do lodo.

Os dois sistemas de tratamento avaliados (SAC e controle) apresentaram capacidade de tratamento do lodo dos RFTS, no que se refere à redução de organismos patogênicos e à estabilização. Entretanto, a redução de patógenos foi maior e mais rápida no tanque controle enquanto que para o processo de estabilização isso ocorreu no SAC.

A espessura da camada de lodo de ambos os sistemas aumentou ao longo das aplicações, variando conforme a taxa de aplicação de sólidos e o teor de umidade do lodo. A taxa média de acúmulo de lodo no SAC foi de 1,1 cm ao mês, o que representa a necessidade de uma borda livre de 13 cm para cada ano de projeto, além do valor correspondente à recepção do volume de cada aplicação.

De forma geral, ambos os sistemas apresentaram-se como adequada opção para o tratamento do lodo de RFTS acumulado na superfície do leito de tratamento.

7 RECOMENDAÇÕES

A aplicação agrícola do lodo dos RFTS tratado no sistema experimental deve ser condicionada ao atendimento integral da resolução Conama nº 375/2006, principalmente em relação à presença de compostos tóxicos (orgânicos e inorgânicos), ao manejo do solo e do lodo, além da aptidão das culturas.

Estudos específicos devem ser feitos para avaliação de quais fenômenos foram realmente responsáveis pelo tratamento do lodo de RFTS, objetivando sua compreensão e aplicação prática.

A capacidade de absorção de contaminantes, em especial de metais tóxicos, na estrutura do Capim Vetiver deve ser melhor compreendida com vistas à posterior utilização/destinação de sua massa foliar e radicular.

Além disso, devem ser realizadas pesquisas que apresentem critérios de projeto que considerem a taxa ótima de aplicação e a eficiência de tratamento da fração líquida e do lodo do RFTS.

8 REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7.229**: Dispõe sobre as condições exigíveis para projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos, incluindo tratamento e disposição de efluentes e lodo sedimentado. Rio de Janeiro, 1993.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004**: Dispõe sobre a classificação dos resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- AISSE, M. M. et al. Tratamento e destino final do lodo gerado em reatores anaeróbios. In: **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. José Roberto Campos (coord.). Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- ALMEIDA, R. A. **Substratos e plantas no tratamento de esgoto por zona de raízes**. Tese de doutorado. Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2005.
- ALMEIDA, R. A.; PITALUGA, D. P. S; REIS, R. P. A. Tratamento de esgoto doméstico por zona de raízes precedida de tanque séptico. **Revista Biociências**: 16 (1), 2010.
- ANDRADE NETO, C. O. et al. Análise do desempenho das duas câmaras de um decanto-digestor de câmaras em série. **Anais do IX Simpósio Luso – Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Bahia/Porto Seguro: ABES, 9 a 14 de abril de 1999.
- ANDRADE, J. C.; TAVARES, S. R. L.; MAHLER, C. F. **Fitorremediação: O uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- ANDREOLI, C. V; CHERUBINI, C.; FERREIRA, A. C. Inviabilização de ovos de helmintos em lodo de esgoto anaeróbio através da solarização. In: **VI Seminário Nacional de Resíduos Sólidos**, 2002, Gramado/RS.
- ANDREOLI, C. V.; POMPEO, R. P. Introdução. In: **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**. Cleverton Vitório Andreoli (coord.). Rio de Janeiro: ABES, 2009.
- APHA – American Public Health Association; AWWA – American Water Works Association e WPCF – Water Pollution Control Federation, 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st ed. Washington, DC.
- ARANGO, H. G. **Bioestatística: teórica e computacional com banco de dados reais em disco**. 3^oed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012.
- ARAÚJO, F. F.; GIL, F. C.; TIRITAN, C. S. Lodo de esgoto na fertilidade do solo, na nutrição de *Brachiaria decumbens* e na atividade da desidrogenase. Goiânia: **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 39 (1): 1-6, 2009
- ARIAS, C. A. et al. Removal of indicator bacteria from municipal wastewater in an experimental two-stage vertical flow constructed wetland system. **Water Science and Technology**, 48 (5), 2003.
- BAIRD, C. **Química ambiental**. 2^oed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

- BASTOS, R. K. X. Uso Agrícola de Lodo Proveniente de Esgoto Sanitário: Revisão da resolução CONAMA nº375/2006. In: XV SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA, 2012, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos...** Belo Horizonte: Hotel Minas Ouro, 2012. Mesa-redonda. Disponível em: <<http://www.abes.locaweb.com.br/XP/XP-EasyPortal/Site/XP-PortalPaginaShow.php?id=672&min=0>>. Acesso em: 19 abr. 2012.
- BEGG, J. S.; LAVIGNE, R. L.; VENEMAN, P. L. Reed beds: constructed wetlands for municipal wastewater treatment plant sludge dewatering. **Water Science Technology**, 44 (11-12): 393-398, 2001.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: **Lodo de Esgoto: Impactos ambientais na agricultura**. Wagner Bettiol e Otávio Antônio de Camargo (editores). Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.
- BIANCHI, V. et al. Efficiency assessment of a reed bed pilot plant (*Phragmites australis*) for sludge stabilisation in Tuscany (Italy). **Ecological Engineering**, 37 (5): 779-785, 2011.
- BRANDT, R. et al. Potential of vetiver (*Chrysopogon Zizanioides (L.) Nash*) for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela. **International Journal of Phytoremediation**, 8(1): 273-284, 2006.
- BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. 3 ed. rev. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2004. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/internet/arquivos/biblioteca/eng/eng_saneam2.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2012.
- BRASIL – Ministério de Ciências e Tecnologia. Chamada pública MCT / MCIDADES / FINEP / Ação Transversal – Saneamento ambiental e habitação - 7/2009. Seleção pública de propostas para apoio a projetos de pesquisa científica, tecnológica e inovação nas áreas de saneamento ambiental e de habitação, 2009.
- BRASIL, M. S.; MATOS, A. T.; SOARES, A. A. Plantio e desempenho fenológico da taboa (*Thypha sp.*) utilizada no tratamento de esgoto doméstico em sistema alagado construído. Artigo técnico: **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 12 (3), 2007.
- BRASIL, M. S.; MATOS, A. T. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. Artigo técnico: **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 13 (3), 2008.
- BRIX, H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. **Water Science and Technology**, 29 (4), 1994.
- BRIX, H. Plants used in constructed wetlands and their functions. In: **1º International seminar on the use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands**. Lisboa, Portugal, 2003.
- BUFÁIÇAL, D. S. S. **Eficiência do leito de macrófitas na remoção de ovos de helmintos e coliformes termotolerantes e no desaguamento de lodo de esgoto sanitário**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - Critérios para projeto e operação.** Manual técnico. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. São Paulo: CETESB, 1999.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras:** água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. Brandão, C. J.; Botelho, M. J. C.; Sato, M. I. Z.; Lamparelli, M. C. (Orgs). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006 do Conselho Nacional de Meio Ambiente.** Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/Res-CONAMA-375-06.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2012.

CORAUCCI FILHO, B. et al. Bases conceituais da disposição controlada de águas residuárias no solo . In: **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** José Roberto Campos (coord.). Rio de Janeiro: ABES, 1999.

DANH, L. T. et al. Vetiver grass, *Chrysopogon zizanioides*: a choice plant for phytoremediation of heavy metals and organic wastes. **International Journal of Phytoremediation**, 11(1): 664-691, 2009.

DATTA, R. et al. Phytoremediation potential of vetiver grass [*chrysopogon zizanioides (l.)*] for tetracycline. **International Journal of Phytoremediation**, 15 (4): 343-351, 2013.

EDIBASCONSTRUÇÕES – Edibas Projetos e Construções. Disponível em: <<http://www.edibasconstrucoes.com/>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Solos. **Método para coleta de amostras de solos para análise.** Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/servicos/metodo_coleta.html>. Acesso em: 15 maio 2013.

GREENWAY, M. Nutrient content of wetland plants in constructed wetlands receiving municipal effluent in tropical Australia. **Water Science Technology**, 35: 135-142, 1997.

HABERL, R.; PERFLER, R.; MAYER, H. Constructed wetlands in Europe. **Water Science Technology**, 32 (3), 1995.

HARTMANN, C. M. et al. Definições, histórico e estimativas de geração de lodo séptico no Brasil. In: **Lodo de fossa e tanque séptico:** caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final. Cleverson Vitorio Andreoli (coord.). Rio de Janeiro: ABES, 2009. Disponível em: < http://www.finep.gov.br/prosab/livros/prosab5_tema%206.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2012.

HESPANHOL, I. Biossólidos, meio ambiente e saúde pública: Critérios para o estabelecimento de diretrizes. In: TSUTIYA, M.T. et al. (Eds). **Biossólidos na agricultura.** São Paulo: Sabesp, 2001.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **PNSB 2008:** Abastecimento de água chega a 99,4% dos municípios, coleta de lixo a 100%, e rede de

esgoto a 55,2%. Publicado em 20 de agosto de 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1691&id_pagina=1>. Acesso em: 30 maio 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas Saneamento 2011**: saneamento básico melhora em todas as regiões do país, mas diferenças ainda existem. Publicado em 19 de outubro de 2011. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1998&id_pagina=1>. Acesso em: 30 maio 2012.

INGUNZA, M. D. P. D. et al. Caracterização física, química e microbiológica do lodo de fossa/tanque séptico. In: **Lodo de fossa e tanque séptico**: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final. Cleverson Vitorio Andreoli (coord.). Rio de Janeiro: ABES, 2009.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. ABES. 6ª edição, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. **Treatment wetlands**. Taylor & Francis Group, 2ª ed, 2009.

KIM, B.; SMITH, E. Evaluation of sludge dewatering reed beds: A niche for small systems. **Water Science and Technology**, 35 (6): 21-28, 1997.

KOOTTATEP, T. et al. Constructed wetlands for septage treatment. In: **8ª International Conference on wetlands systems for water pollution control**, Arusha, Tanzânia, 2002.

KOOTTATEP, T. et al. Treatment of septage in constructed wetlands in tropical climate – Lessons learnt after seven years of operation. In: **9th International IWA Specialist Group Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control**, Avignon, France, 2004a.

KOOTTATEP, T. et al. Material fluxes in constructed wetlands treating septage and their polishing systems. In: **9th International IWA Specialist Group Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control**, Avignon, France, 2004b.

LIÉNARD, A.; PAYRASTRE, F. Treatment of sludge from septic tanks in a reed-bed filters pilot plants. In: **5ª International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control**, Vienna, Austria, 1996.

MANGKOEDIHARDJO, S.; TRIASTUTI, Y. Vetiver in Phytoremediation of Mercury Polluted Soil with the Addition of Compost. **Journal of Applied Sciences Research**, 7 (4): 465-469, 2011.

MANSON, R. J.; MERRITT, C. A. Land application of liquid municipal wastewater sludges. **Journal Water Pollution Control Federation**, 47 (1): 20-29, 1975.

MATOS, A. T. et al. Influência da taxa de carga orgânica no desempenho de sistemas alagados construídos cultivados com forrageiras. Artigo técnico: **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 15 (1), 2010.

NIKOLIĆ, V.; MILIĆEVIĆ, D.; MILENKOVIĆ, S. Wetlands, constructed wetlands and their's role in wastewater treatment with principles and examples of using it in Serbia. **Architecture and Civil Engineering**, 7 (1), 2009.

NIELSEN, S.; WILLOUGHBY, N. Sludge treatment and drying reed bed systems in Denmark. **Water and Environment Journal**, 19 (4): 296–305, 2005.

NOUMSI, I. M. et al. Potencial of sludge drying beds vegetated with *Cyperus papyrus* L. and *Echinochloa pyramidalis* (LAM.) Hitchc & Chase for faecal sludge treatment in tropical regions. In: **Internacional conference on wetland systems for water pollution control**. Lisboa, 2006.

PHILIPPI, L. S. et al. **Eficácia dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico e de água para consumo humano utilizando wetlands considerando períodos diferentes de instalação e diferentes substratos e plantas utilizados**. Relatório final. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

PITALUGA, D. P. S. **Avaliação de diferentes substratos no tratamento de esgoto sanitário por zona de raízes**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

QUEGE, K. E. **Tratamento de esgoto sanitário pelo sistema zona de raízes utilizando plantas de bambu**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

QUEGE, K. E.; ALMEIDA, R. A.; UCKER, F. E. Utilização de plantas de bambu no tratamento de esgoto sanitário pelo sistema de alagados construídos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, 10 (10): 2069-2080, 2013.

RANGEL, S. et al. Efeito de aplicações de lodos de esgoto sobre os teores de metais pesados em folhas e grãos de milho. Viçosa: **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30 (3): 583-594, 2006.

RATIS, A. N. F. A. **Caracterização dos resíduos esgotados de sistemas de tratamento individual de esgotos domésticos de Natal**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, 2009.

RIOS, F. P. **Avaliação de sistemas individuais de disposição de esgotos e das empresas limpa-fossas na região metropolitana de Goiânia**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás. Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, 2010.

ROTKITTIKHUN, P. et al., Growth and lead accumulation by the grasses *Chrysopogon Zizanioides* and *Thysanolaena maxima* in lead-contaminated soil amended with pig manure and fertilizer: A glasshouse study. **Chemosphere**, 66, 2006.

SÂNCHEZ-CARRILLO, S. et al. A simple method for estimating water loss by transpiration in wetlands. **Hydrological Sciences-Journal-des Hydrologiques**, 46 (4): 537-552, 2001.

SARMA, H. Metal hyperaccumulation in plants: A review focusing on phytoremediation technology. **Journal of Environmental Science and Technology**, 4: 118-138, 2011.

SHU, W.; XIA, H. **Integrated Vetiver Technique for Remediation of Heavy Metal Contamination: Potential and Practice**. 2005. Disponível em: <http://www.vetiver.org/ICV3-Proceedings/CHN_heavy_metal.pdf>. Acesso em: 20 maio 2012.

SILVA, S. C. **“Wetlands construídos” de fluxo vertical com meio suporte de solo natural modificado no tratamento de esgoto doméstico**. Tese de doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, 2007.

SOLANO, M. L.; SORIANO, P.; CIRIA, M. P. Constructed wetlands as a sustainable solution for wastewater treatment in small villages. **Biosystems Engineering**, 87 (1): 109-118, 2004.

SOUSA, J. T. et al. Utilização de wetland construído no pós-tratamento de esgotos domésticos pré-tratados em reatores UASB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 9 (4): 285-290, 2004.

STEFANAKIS, A. I. et al. Surplus activated sludge dewatering in pilot-scale sludge drying reed beds. **Journal of Hazardous Materials**, 172: 122-1130, 2009.

STEFANAKIS, A. I.; TSIHRINTZIS, V. A. Dewatering mechanisms in pilot-scale Sludge Drying Reed Beds: Effect of design and operational parameters. **Chemical Engineering Journal**, 172: 430– 443, 2011.

STOTTMEISTER et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. **Biotechnology Advances**, 22: 93–117, 2003.

SUNTTI, C.; MAGRI, M. E.; PHILIPPI, L. S. Filtros plantados com macrófitas de fluxo vertical aplicados na mineralização e desaguamento de lodo de tanque séptico. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 16 (1), 2011.

TRUONG, P. Vetiver Grass Technology for Mine Rehabilitation. **Technology Bull**, nº 1999/2, Bangkok, Thailand, 1999. Disponível em: <http://www.vetiver.com/PRVN_mine-rehab_bul.pdf>. Acesso em: 25 set. 2013.

TRUONG, P.; HART, B. Vetiver system for wastewater treatment. **Pacific Rim Vetiver Network Technical Bulletin**, 2001. Disponível em: <http://www.vetiver.org/PRVN_wastewater_bul.pdf>. Acesso em: 25 set. 2013.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos. In: TSUTIYA, M. T. et al. (Eds). **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: Sabesp, 2001.

UN-HABITAT - United Nations Human Settlements Programme. **Constructed Wetlands Manual. UN-HABITAT Water for Asian Cities Programme Nepal**, Kathmandu, 2008.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **40 CFR Part 503 - Appendix B**, Federal Register, de 19 de fevereiro de 1993.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Manual: Constructed Wetlands**

Treatment of Municipal Wastewater. Office of Research and Development Cincinnati, Ohio, 2000. Disponível em: <<http://water.epa.gov/type/wetlands/restore/upload/constructed-wetlands-design-manual.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2013.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **PART 503 — Standards for the use or disposal of sewage sludge.** 2007. Disponível em: <[http://yosemite.epa.gov/r10/water.nsf/NPDES%2BPermits/Sewage%2BS825/\\$FILE/503-032007.pdf](http://yosemite.epa.gov/r10/water.nsf/NPDES%2BPermits/Sewage%2BS825/$FILE/503-032007.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2012.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Wetlands.** 2013. Disponível em: <<http://water.epa.gov/type/wetlands/index.cfm>>. Acesso em: 08 mar. 2013.

WU, F. Y. et al. Root exudates of wetland plants influenced by nutrient status and types of plant cultivation. **International Journal of Phytoremediation**, 14 (6): 543-553, 2012.

YANKO, T. **Método analítico para ovos de helmintos viáveis.** Brasília: Versão expandida por Conama nº 375/2006, Yanko. Companhia de Saneamento do Distrito Federal, 1987.



Termo de Ciência e de Autorização para Disponibilizar as Teses e Dissertações Eletrônicas (TEDE) na Biblioteca Digital da UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás-UFG a disponibilizar gratuitamente através da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações – BDTD/UFG, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor:	Édio Damásio da Silva Junior		
CPF:	031.058.091-98	E-mail:	ediodamasio@gmail.com
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não			
Vínculo Empregatício do autor	Bolsista		
Agência de fomento:	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	Sigla:	CAPES
País:	Brasil	UF:	DF
CNPJ:	00889834/0001-08		
Título:	Tratamento do lodo de resíduos de fossas e tanques sépticos em um sistema de alagado construído		
Palavras-chave:	Fitoremediação; Higienização; Reuso agrícola		
Título em outra língua:	Septic tanks and cesspools residues sludge treatment at a constructed wetlands system		
Palavras-chave em outra língua:	Phytoremediation; Sanitation; Agricultural reuse		
Área de concentração:	Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	13/11/2013		
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia de Meio Ambiente		
Orientador:	Rogério de Araújo Almeida		
CPF:	-----	E-mail:	rogerioufg@gmail.com
Co-orientador:	-----		
CPF:	-----	E-mail:	-----

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização?¹ total parcial

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Édio Damásio da Silva Junior

Assinatura do autor

Data: 13 / 12 / 2013

¹ Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e meta dados ficarão sempre disponibilizados.