

ANDRÉ PHELIPE RODRIGUES DA SILVA

**USO DE TRAÇADORES PARA AVALIAÇÃO DA HIDRODINÂMICA DE UM
TANQUE DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO – TEVAP**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586u
2019

Silva, André Phelipe Rodrigues da, 1993-
Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de um
tanque de evapotranspiração - TEvap / André Phelipe Rodrigues
da Silva. – Viçosa, MG, 2019.
xii, 50 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Ana Augusta Passos Rezende.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 45-50.

1. Esgotos. 2. Hidrodinâmica. 3. Eficiência. 4. Dispersão.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
II. Título.

CDD 22. ed. 628.3

ANDRÉ PHELIPE RODRIGUES DA SILVA

**USO DE TRAÇADORES PARA AVALIAÇÃO DA HIDRODINÂMICA DE UM
TANQUE DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO – TEVAP**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

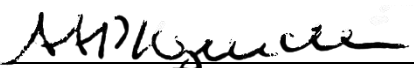
APROVADA: 10 de maio de 2019.



Alisson Carraro Borges



Claudio Mudadu Silva



Ana Augusta Passos Rezende
(Orientadora)

“Ora, a fé é o firme fundamento das coisas que se espera, e a prova das coisas que se não veem”.

Hebreus 11;1.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por permitir que, em meio a todas as dificuldades, chegasse a esse momento em minha vida.

À minha família, em especial, à minha mãe Ana e à Raquel, por serem exemplos para mim.

À Marta, que assumiu grandes responsabilidades, e sem a qual não poderia me dedicar ao mestrado.

À Tamires, por ter me apoiado, não apenas nos bons momentos, mas principalmente nos momentos difíceis, mostrando que sempre há uma alternativa.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de realização do mestrado.

À professora e orientadora Ana Augusta Passos Rezende, pelo apoio, competência, paciência e cobrança, que me ajudaram a crescer profissional e pessoalmente.

Aos professores Alisson Borges e Cláudio Mudadu, membros da banca, pelo aceite em contribuir para o enriquecimento deste estudo e pelos diversos conselhos durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos funcionários do Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal e aos meus companheiros de laboratório, Alex, Gabriel, Giovani, Josi e Tati Oda, pelos papos, discussões, críticas e conselhos, que ajudaram muitíssimo nesses dois anos de mestrado. Em especial, a Iany, que muito contribuiu para a elaboração deste estudo.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

À mocidade de Viçosa, que me recebeu com tanto carinho e facilitou minha adaptação nesta cidade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo Geral	2
2.2 Objetivos Específicos	2
3 REFERENCIAL TEÓRICO	3
3.1 Saneamento Rural	3
3.2 Sistema Tanque de Evapotranspiração (TEvap)	4
3.3 Estudos hidrológicos com Traçadores Ambientais	7
3.4 Comportamento Hidrodinâmico	9
4 MATERIAL E MÉTODOS	15
4.1 Montagem do iloto do sistema TEvap	15
4.2 Caracterização do Meio Filtrante	17
4.3 Etapas Experimentais	18
4.3.1 Vazão adotada	18
4.3.2 Etapa 1	18
4.3.3 Etapa 2	18
4.4 Ensaio Hidrodinâmico	19
4.4.1 Definição dos Traçadores	19
4.4.2 Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos	20
4.4.3 Verificação de Zonas Mortas e Índice de Curto-Circuito	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1 Etapa 1	22
5.1.1 Operação com meios filtrantes	22
5.1.2 Comparação das alturas dos meios filtrantes	28
5.2 Etapa 2	32
5.3 Comportamento hidrodinâmico	36
5.3.1 Parâmetros Hidrodinâmicos	36
5.3.2 Anomalias no sistema	41

5.4	Avaliação dos critérios para dimensionamento	42
6	CONCLUSÕES	44
7	RECOMENDAÇÕES	44
	REFERÊNCIAS	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de um tanque de evapotranspiração - TEvap.	5
Figura 2 - Sistema de um reator de escoamento em pistão.	9
Figura 3 - Sistema de um reator de mistura completa.	10
Figura 4 - Sistema de um reator de fluxo disperso.	11
Figura 5 - Principais problemas de ordem hidráulica identificadas em reatores.	12
Figura 6 - Curva de passagem do traçador.	13
Figura 7 - Curva DTR.	14
Figura 8 - Piloto do tanque de evapotranspiração.	16
Figura 9 a) e b) - Esquema do fluxo do traçador no tanque de evapotranspiração.	16
Figura 10 - Ensaio Granulométrico dos meios filtrantes utilizados no preenchimento do TEvap.	17
Figura 11 - Características físicas e químicas do horizonte A e B do solo.	17
Figura 12 - Curvas Respostas utilizando Rodamina B e NaCl nos meios filtrantes pedra de mão, brita e areia.	24
Figura 13 - Registro fotográfico da retida do meio filtrante e presença de rodamina B estagnada no fundo.	25
Figura 14 - Comparação das curvas respostas dos traçadores nos meios filtrantes nas alturas T1 e T2.	30
Figura 15 - Comparação das curvas respostas dos traçadores nos meios filtrantes nas alturas T3 e T4.	31
Figura 16 - Curva resposta do sistema montado com e sem vegetação utilizando NaCl como traçador.	33
Figura 17 - Pluma do traçador no sistema montado com todas camadas filtrantes com e sem vegetação.	35
Figura 18 - Curvas típicas de resposta de traçador para reator de fluxo pistonado e mistura, conforme modelo de dispersão.	39
Figura 19 - Condições de contorno usadas com o modelo de dispersão.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações para determinar Índice de Dispersão de Morril, Índice do Tempo de Retenção Médio e Eficiência Hidráulica.	21
Tabela 2 - Equações para determinação da presença de zonas mortas e índice de curto-circuito.	22
Tabela 3 - Variáveis temporais obtidas nos ensaios hidrodinâmicos com os meios filtrantes.	27
Tabela 4 - Variáveis temporais obtidas nos ensaios com o sistema montado.	34
Tabela 5 - Parâmetros hidrodinâmicos obtidos nos ensaios.	38
Tabela 6 - Valores calculados para o numero de dispersão.	40
Tabela 7 - Resultados das anomalias no sistema obtidos pelos traçadores.	41

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

TEvap	Tanque de Evapotranspiração
DTR	Distribuição do Tempo de Residência
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico
CE	Condutividade Elétrica
IDM	Índice de Dispersão de Morril
ITRM	Índice do Tempo de Retenção Médio
ev	Eficiência Volumétrica
ICC	Índice de Curto-Circuito
λ	Eficiência hidráulica
σ	Variância
®	Marca Registrada

RESUMO

SILVA, André Phelipe Rodrigues, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2019. **Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de um tanque de evapotranspiração - TEVAP.** Orientadora: Ana Augusta Passos Rezende.

O lançamento de esgoto doméstico não tratado nos corpos d'água causa impactos no meio ambiente e na saúde dos consumidores humanos. A segregação do esgoto doméstico em águas cinzas (geradas em pias, chuveiros, lavadoras e lavanderias) e em águas fecais ou escuras (geradas no banheiro) possibilitam um tratamento mais efetivo, permitindo o uso de efluentes tratados. O tanque de evapotranspiração (TEvap) é um sistema proposto pela permacultura para tratar águas residuais fecais, permitindo a reutilização da água e utilização de nutrientes. Esse sistema ainda carece de conhecimento sobre os critérios de dimensionamento e operação, o que permite uma melhor compreensão da tecnologia e garante boa eficiência de tratamento a custos acessíveis. O objetivo desta pesquisa foi estudar o comportamento hidráulico de um sistema TEvap construído como uma planta em escala piloto usando traçadores. O sistema consistia em um tanque estanque de polipropileno, com uma câmara anaeróbica na base e preenchida com camadas de meios filtrantes, compostas de materiais como detritos de construção, cascalho, areia e solo, dispostos para cima nessa ordem. O sistema continha torneiras instaladas em cada camada de filtragem para amostragem. O estudo foi dividido em duas fases. Na fase I, os testes objetivaram compreender o comportamento hidráulico de cada meio filtrante em diferentes alturas. Na Fase II, o sistema TEvap foi montado com as várias camadas e avaliado o comportamento hidrodinâmico com a presença e ausência de vegetação. Foram utilizados dois marcadores, um sal (NaCl) e um composto de fluorescência (rodamina B). Eles foram injetados separadamente no sistema para obter a curva de distribuição do tempo de residência (DTR), a determinação de anomalias (curto-circuito e zonas mortas) e a eficiência do sistema hidráulico. Com base nos resultados, foi possível concluir que a rodamina não apresentou desempenho satisfatório na avaliação do sistema de fluxo ascendente. Observou-se uma estagnação no fundo do sistema TEvap e apenas pequenas quantidades do traçador se dispersaram. O NaCl apresentou melhor desempenho para estudos hidrodinâmicos no TEvap. Foi possível determinar os parâmetros hidrodinâmicos com uma recuperação satisfatória. À medida que a altura da camada aumentava, havia um aumento na eficiência hidráulica. A presença de vegetação aumentou o IDM (Índice de Dispersão de Morril),

reduziu o ITRM (Índice do Tempo de Retenção Médio) e reduziu as zonas mortas, causando uma diminuição geral da área demandada por um TEvap. A altura mais adequada das camadas foi de 0,30 m para pedra, 0,20 m para cascalho e 0,20 m para areia. Conclui-se neste estudo que foi possível obter os parâmetros hidrodinâmicos e compreender o funcionamento deste sistema, aplicando traçadores.

ABSTRACT

SILVA, André Phelipe Rodrigues, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2019. **Use of tracers to evaluate the hydrodynamics of an evapotranspiration tank - TEVAP.** Adviser: Ana Augusta Passos Rezende.

The release of untreated sewage into water bodies causes impacts on the environment and on the health of the human consumers. The segregation of the domestic sewage in gray water (generated in sinks, showers, washing machines and laundries) and fecal or dark water (generated in the toilet) enable a more effective treatment allowing the use of treated effluent. The evapotranspiration tank (TEvap) is a system proposed by permaculture to treat fecal wastewaters, allowing reuse of water and nutrient utilization. This system still lacks knowledge regarding sizing and operating criteria, which allows a better understanding of the technology and ensure good treatment efficiency at affordable costs. The objective of this research was to study the hydraulic behavior of a TEvap system built as a pilot scale plant using tracers. The system consisted of a polypropylene watertight tank, with an anaerobic chamber at the base and filled with layers of filter media, composed of materials such as building debris, gravel, sand and soil, arranged upwards in this order. The system contained taps installed in each filtering layer for sampling. The study was divided in two phases. Phase I the tests aimed the understanding of the hydraulic behavior of each filter medium in different heights. In Phase II, the TEvap system was assembled with the several layers, and the hydrodynamic behavior with the presence and absence of vegetation was evaluated. Two tracers were used, a salt (NaCl) and a fluorescence compound (rhodamine B). They were injected into the system in order to obtain the residence time distribution curve (RTD), the determination of anomalies (short-circuiting and dead zones) and the hydraulic system efficiency. Based on the results, it was possible to conclude that rhodamine did not have a satisfactory performance for evaluating the upflow system. It was observed a stagnation at the bottom of the TEvap system and only small quantities of the tracer dispersed around. The NaCl showed a better performance for hydrodynamic studies in the TEvap. It was possible to determine the hydrodynamic parameters with a satisfactory recovery. As the layer height increased, there was an increase in the hydraulic efficiency. The presence of vegetation increased the MDI (Morris dispersion index), reduced the MTRI or ev. (mean time retention index or volumetric efficiency) and reduced the dead zones causing an overall decrease of the area demanded for a TEvap,. The most suitable height of the layers were 0.30

m for stone, 0.220 m for gravel and 0.220 m for sand. It is concluded in this study that it was possible to obtain the hydrodynamic parameters and understand the operation of this system by applying tracers.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os serviços existentes de coleta e tratamento de esgotos sanitários não atendem a toda a população, o que expõe o cidadão a várias doenças decorrentes da falta de saneamento. Considerando que a população tem uma taxa de crescimento de 0,75% no período de um ano (IBGE, 2017), a situação se agrava, fazendo-se necessário sistemas de tratamento que possam atender a essas pessoas de forma mais efetiva.

Nas zonas rurais, o problema com a disposição inadequada dos esgotos domésticos é ainda mais grave. Estas localidades normalmente não possuem nenhuma infraestrutura para o tratamento do esgoto gerado, o qual costuma ser lançado diretamente no solo ou no curso d'água. Segundo dados do IBGE (2010), além do solo e dos cursos d'água, o esgoto doméstico nessas áreas é disposto em fossas rudimentares (53,9 %) e fossas sépticas (13,9 %). As consequências ambientais, financeiras e sociais dessa má disposição de efluentes são expressivas, pois segundo o IBGE (2010), 16 % da população se encontra em áreas rurais.

Em certos casos, esse despejo inadequado pode ultrapassar a capacidade de resiliência do ambiente, de forma que a busca por alternativas de sistemas individuais de tratamento e disposição tem se tornado cada vez mais oportuna. Os sistemas alternativos devem apresentar boa eficiência, evitar proliferações de doenças e ser acessível a todos.

Conforme a literatura da área, os esgotos gerados nas residências podem ser divididos em águas cinzas e águas de vasos sanitários. O primeiro termo caracteriza as águas residuárias provenientes de pias, chuveiros, máquinas de lavar roupa e lavatórios, e o segundo, aquelas águas que vêm exclusivamente dos vasos sanitários, contendo fezes e urina. Promover a segregação desses tipos de efluente pode facilitar o tratamento, e os esgotos contendo fezes e urina possuem altas cargas de material orgânico e nutrientes, que podem ser aproveitados de diversas maneiras.

Nesse contexto, destaca-se uma tecnologia com potencial para tratar a água proveniente de vasos sanitários, desenvolvida por permacultores, conhecida como tanque de evapotranspiração (TEvap), e que vem sendo implantada em propriedades rurais pelo país. Esse sistema trata de forma descentralizada o efluente dos vasos sanitários, que já separado do restante dos efluentes da residência, é encaminhado a uma câmara anaeróbia de recepção, permeando por camadas filtrantes de forma ascendente. Na parte inferior do tanque ocorre a digestão anaeróbia do efluente. Quando o efluente atinge o solo, ele é

absorvido por plantas, que o liberam por meio da transpiração, ou é evaporado diretamente do solo. As plantas também realizam a absorção dos nutrientes mineralizados no solo.

Não há normas técnicas com critérios e diretrizes para o dimensionamento e implantação de um sistema TEvap. Os valores adotados em projetos são empíricos, baseados em experiências e em alguns critérios da normatização brasileira para tanque séptico.

Estudar o comportamento hidrodinâmico deste sistema permite compreender o seu funcionamento, sendo possível propor critérios de dimensionamento e operação mais adequados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O estudo teve como objetivo a avaliação do comportamento hidrodinâmico do sistema de tratamento de águas fecais domésticas conhecido como Tanque de Evapotranspiração – TEvap –, por meio do uso de traçadores.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento hidrodinâmico de um sistema piloto de um tanque de evapotranspiração, utilizando a técnica de injeção de traçadores.
- Avaliar a eficiência dos traçadores NaCl e rodamina B na obtenção de parâmetros hidrodinâmicos.
- Identificar a presença de zonas mortas e índice de curto-circuito no sistema.
- Determinar a eficiência hidráulica do sistema estudado.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Saneamento Rural

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010; 2017), a população brasileira era de 204 milhões de brasileiros em 2010 (atualmente são 207 milhões), dos quais 16 % vivem em zonas rurais. Em 2009, estima-se que somente 25% da população rural teve acesso à coleta ou tratamento de esgoto, e de tudo o que é coletado, apenas 10% é tratado, o remanescente é despejado nos corpos d'água (IBGE, 2011). Segundo o Atlas Esgoto da Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), 12% do esgotamento sanitário da população brasileira é atendido por solução individual (fossa séptica).

A melhoria no saneamento beneficia diretamente a saúde da população, promovendo, por exemplo, a redução da mortalidade infantil. Acesso a água limpa e esgoto tratado reduz até um quinto dos índices de mortalidade infantil, salvando a vida de inúmeras crianças, que morrem todos os dias em decorrência das doenças relacionadas à falta de saneamento básico (COSTA; GUILHOTO, 2015).

O esgoto pode ser classificado de acordo com sua origem e composição, dividindo-se em águas cinzas e águas provenientes de vasos sanitários ou fecais. Águas cinzas são definidas como águas provenientes de lavatórios, tanques, máquinas de lavar roupa e chuveiros (FIORI; FERNANDES; PIZZO, 2006). Segundo Gonçalves (2009), a quantidade gerada desse efluente apresenta variações de um local para outro, mas somente o lavatório e o chuveiro geram aproximadamente 92,9 L/hab.dia de águas cinzas.

Von Sperling e Sezerino (2018) adotam o nome de águas fecais para o esgoto oriundo de descargas de vasos sanitários (fezes e urina). Embora sejam produzidas em menor volume que as águas cinzas, esse tipo de efluente pode representar maior risco de contaminação, sendo necessário um tratamento diferenciado, adequado às suas características (PAULO *et al.*, 2013). Esse efluente é originário de vasos sanitários ou dispositivos separadores, apresentando fezes, urina e papel higiênico. Apresentam-se com elevada carga orgânica, sólidos suspensos e sedimentáveis (GONÇALVES, 2006).

Rebouças *et al.* (2007) relatam valores de 24 a 32 L/hab.dia, considerando que um habitante utiliza o vaso sanitário cinco vezes por dia, em média, sendo quatro para urinar e uma para defecar. Além disso, deve-se considerar a utilização inadequada não derivada apenas das necessidades fisiológicas.

As principais características das águas providas de vasos sanitários podem ser resumidas, segundo Gonçalves (2006), como:

- Concentração elevada de material orgânico e sólidos em suspensão;
- Grande variação temporal de vazão e geração descontínua;
- Influência do consumo de água pelo vaso sanitário, que pode apresentar menor ou maior consumo, aumentando ou diminuindo, respectivamente, a concentração dos compostos nas fezes e na urina.

A segregação de águas do vaso sanitário e de águas cinzas admite o tratamento descentralizado e simplificado desses dois tipos de esgotos domésticos, o que possibilita maior eficiência no tratamento e reúso de água e nutrientes que compõem o esgoto. Com a segregação das águas domésticas, um dos poucos sistemas individuais existentes para o tratamento de esgotos de vasos sanitários é o Tanque de Evapotranspiração (TEvap), uma tecnologia que além do tratamento do esgoto possibilita o reúso da água de vaso sanitário (PAULO *et al.*, 2013; PAMPLONA; VENTURI, 2004; PIRES, 2012).

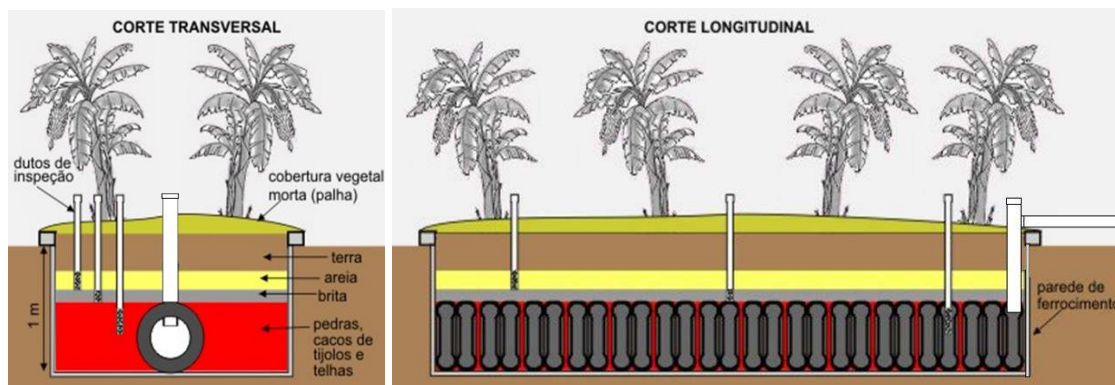
3.2 Sistema Tanque de Evapotranspiração (TEvap)

O sistema Tanque de Evapotranspiração, apresentado na Figura 1, é uma tecnologia idealizada por permacultores, para tratamento do efluente advindo dos sanitários. O tanque consiste em um sistema vegetado, em cujo interior ocorre a decomposição anaeróbia e aeróbia do material orgânico, a mineralização dos nutrientes e a absorção deles e da água pelas raízes das plantas (VIEIRA, 2010). O TEvap pode ser considerado um sistema de tratamento que busca a geração zero de efluente (PAULO *et al.*, 2013).

A criação do sistema TEvap foi atribuída, segundo Galbiati (2009), ao permacultor americano Tom Watson, sendo posteriormente adaptado e implantado no Brasil em localidades tais como Santa Catarina (VIEIRA, 2010), Distrito Federal (PAMPLONA; VENTURI, 2004) e Minas Gerais (PIRES, 2012; BRITO *et al.*, 2012).

Ainda não há normas técnicas com diretrizes para elaboração, dimensionamento e implantação desse sistema, de forma que sua execução tem utilizado, como referência de projeto e operação, as normatizações de tanque séptico (NBR 13.969/97 e NBR 7.229/93 – Projeto, construção e operação).

Figura 1 - Esquema de um tanque de evapotranspiração TEvap.



Fonte: adaptado de Vieira (2010).

Como se pode observar pela Figura 1, o efluente é introduzido no tanque por um tubo e direcionado para o fundo impermeabilizado, onde há uma câmara que promoverá a digestão anaeróbia do efluente. Essa câmara pode ser construída com tijolos, manilhas de concreto e com pneus inservíveis. No fundo do tanque, preenchendo as laterais da câmara de digestão, também são dispostos materiais filtrantes de granulometria similar à da pedra de mão (agregado com dimensões entre 76 e 250 mm) e/ou entulhos da construção civil, os quais funcionarão como material suporte para a formação da comunidade microbiana.

Sobre as pedras de mão, são colocadas, em sequência ascendente, camadas de brita nº 1, areia grossa e solo, que possuem granulometria menor que a do material do fundo, o que aumenta o tempo de residência do efluente no sistema. Sobre o solo, são plantadas vegetações com alta taxa de evapotranspiração, para que elas absorvam a fração líquida do esgoto e a liberem para a superfície (MACHADO *et al.*, 2015). Neste sistema, se operado de maneira correta, não há geração de odor, pois todo o processo ocorre abaixo do nível do solo (PAMPLONA; VENTURI, 2004).

Em sua parte inferior, o sistema TEvap funciona na ausência de oxigênio. Chernicharo (2016) define que a digestão anaeróbia representa um sistema ecológico balanceado, no qual cada microrganismo tem sua função essencial. Segundo o autor, as arqueias metanogênicas, utilizando o hidrogênio, produzem ácido acético, que se converte em metano. O uso do hidrogênio durante esse processo favorece o meio onde as bactérias acidogênicas fermentam os compostos orgânicos. Além do metano, são

produzidos na decomposição da matéria orgânica o gás carbônico e o sulfídrico, a amônia, a biomassa e o efluente tratado.

Há a possibilidade de uma fração do metano gerado na zona anaeróbia do TEvap ser consumida na camada de solo por bactérias metanotróficas, que oxidam metano na presença de oxigênio (GALBIATI, 2009).

Logo que o efluente passa pelo processo anaeróbio, a degradação da matéria orgânica começa a ser promovida por processos aeróbios. A biomassa microbiana neste processo é constituída por bactérias e protozoários, sendo as primeiras em maior número e importância no sistema. Na conversão aeróbia, a matéria carbonácea consome oxigênio do meio, e o processo gera gás carbônico, energia e água. Os compostos orgânicos nitrogenados são nitrificados em ambiente aeróbio, ou seja, ocorre a conversão da amônia em nitrito e, posteriormente, em nitrato, forma na qual o nitrogênio pode ser absorvido pelas plantas contidas no tanque (PAULO *et al.*, 2013).

A camada superior do TEvap (areia e solo) deve exibir condições de saturação de água e permitir sua ascensão para a superfície por capilaridade, a partir de onde será evaporada para o ambiente. A água também é adsorvida pelas partículas do solo e absorvida pelas raízes das plantas, que a translocam para as folhas, de onde evapora e transpira para a atmosfera (FERRI, 1986). Segundo Von Sperling e Sezerino (2018), na evapotranspiração, a perda de água para a atmosfera deve ser expressiva, ocasionando um aumento da concentração dos poluentes no meio líquido.

Deve-se cuidar para que as plantas utilizadas passem por manejo adequado, que maximize sua contribuição nesse sistema e minimize crescimento de plantas invasoras. Os cortes e remoção realizados durante o ciclo da planta potencializam a capacidade de extração de nutrientes e outros compostos. A remoção das plantas, após o corte, evita a liberação no leito filtrante dos compostos absorvidos (VON SPERLING; SEZERINO, 2018).

As plantas recomendadas por Pamplona e Venturi (2004) para este tipo de sistema são: banana (*Musa sp.*), mamão (*Carica papaya L.*) e taioba (*Xanthosoma sagittifolium*), comestíveis. Há também as plantas ornamentais, como copo-de-leite (*Zantedeschia aethiopica*), maria-sem-vergonha (*Impatiens walleriana*), lírio-do-brejo (*Hedychium spp.*), caeté banana (*Heliconia spp.*) e junco (*Zizanopsis bonariensis*).

Não há normativa referente ao dimensionamento de um TEvap. As medidas usadas por Pamplona e Venturi (2004) nesse tipo de sistema foram 1,0 a 1,2 m de

profundidade e 10 m² de área (2x5 m), para uma família com cinco pessoas, resultando, assim, numa área de 2 m² por pessoa. Esse valor é considerado como mínimo e pode variar de acordo com o clima da região. Pires (2012) propôs um sistema com as dimensões: 1,5 m de profundidade e de largura e 3,5 m de comprimento, para famílias de até cinco pessoas, em assentamento de reforma agrária, com acréscimo de 1 m² por pessoa. Legan (2008) sugere que dois tanques sejam construídos em paralelo, trabalhando de forma alternada para evitar extravasamentos. Neste caso, cada tanque teria 1,0 m de largura, 4,0 m de comprimento e 1,0 m de profundidade, para cinco pessoas, e caso houvesse um número maior de pessoas, o comprimento seria expandido.

Aplicando a NBR 13.969 (ABNT, 1997), de dimensionamento de tanques sépticos, na instalação do TEvap, o tanque deveria possuir 2 m³ para cada morador, para que o sistema trabalhe sem extravasamentos. A forma de dimensionamento teria largura de 2,0 m, a profundidade seria de 1,0 m e o comprimento seria igual ao número de moradores (ABNT, 1997).

3.3 Estudos hidrológicos com Traçadores Ambientais

Os estudos hidrológicos compreendem conhecimento, mapeamento e monitoramento das fontes de água (MACEDO, 2004). Segundo Silva (2009), os traçadores surgiram do uso de agentes para monitorar fluxo superficial e subterrâneo, delineamento de velocidades de fluxo de água e até a identificação de fontes poluentes.

Os traçadores geralmente utilizados em estudos hidrológicos são classificados como naturais, quando já são componentes naturais do meio hídrico (Na⁺, K⁺, sólidos totais dissolvidos e condutividade elétrica específica), ou artificiais, quando introduzidos no meio artificialmente pelo homem (uranina, rodamina B e WT, NaCl, LiCl, etc). Os primeiros testes já realizados foram com traçadores artificiais (DRUMOND, 2004).

Os traçadores naturais e artificiais são utilizados tanto em estudos de processos hidrológicos em cursos de água, quanto em lagos e reservatórios. Os traçadores naturais realizam estudos de longa duração em corpos hídricos, podendo estudar as variações sazonais dos processos (DRUMOND, 2004). Em sua pesquisa, este autor utilizou como traçador a rodamina WT, a B e um corante com baixa fluorescência, para testar a aplicação da técnica de traçadores na determinação dos tempos de concentração em uma bacia hidrográfica. Ele concluiu que a rodamina WT foi a que apresentou melhor

resultado, tendo em vista a sua facilidade tanto no manuseio quanto na detecção, destacando o fato de que a rodamina B necessitou de uma alta massa (500 gramas) para detecção.

Um dos traçadores naturais mais usados é o NaCl, cloreto de sódio. Seu uso no estudo da hidrodinâmica de Sistemas Alagados Construídos (SACs) apresenta como resultado a distribuição do tempo de residência real (DTR), que indica o tempo em que o traçador atravessa o sistema, permitindo que seja avaliada a presença de curto-circuito, de zonas mortas e de recirculação interna do fluido (CHAZARENC; MERLIN; GONTHIER, 2003; LEVENSPIEL, 2000; METCALF; EDDY, 2015; KADLEC; WALLACE 2007). Um dos mais importantes empregos de traçadores naturais em águas é nos estudos dos processos de transporte e de escoamento (KÄSS, 1998).

Os traçadores artificiais são empregados em experimentos hidrológicos de curta duração (DRUMOND, 2004). A aplicação de traçadores artificiais em estudos citados por PAYNE (1988) foram: nas medições de vazão, nos estudos do transporte de sedimentos, de direção de fluxo de águas subterrâneas e de estimativas da recarga de aquíferos.

Metcalf e Eddy (2015) listam uma série de traçadores artificiais que podem ser usados para avaliar o desempenho hidráulico de reatores, os quais podem ser divididos em salinos e fluorescentes. Dentre os salinos estão o cloreto de lítio (LiCl) e o fluoreto de sódio (NaF). Já dentre dos fluorescentes, pode-se destacar a rodamina B e a WT, a fluoresceína e o permanganato de potássio (uranina). Headley e Kadlec (2007) dão destaque para rodamina, eosina Y azul de dextran e verde de bromocresol, como traçadores em estudos hidrodinâmicos.

Para ser considerado um bom traçador, segundo Metcalf e Eddy (2015), o reagente deve apresentar as seguintes características:

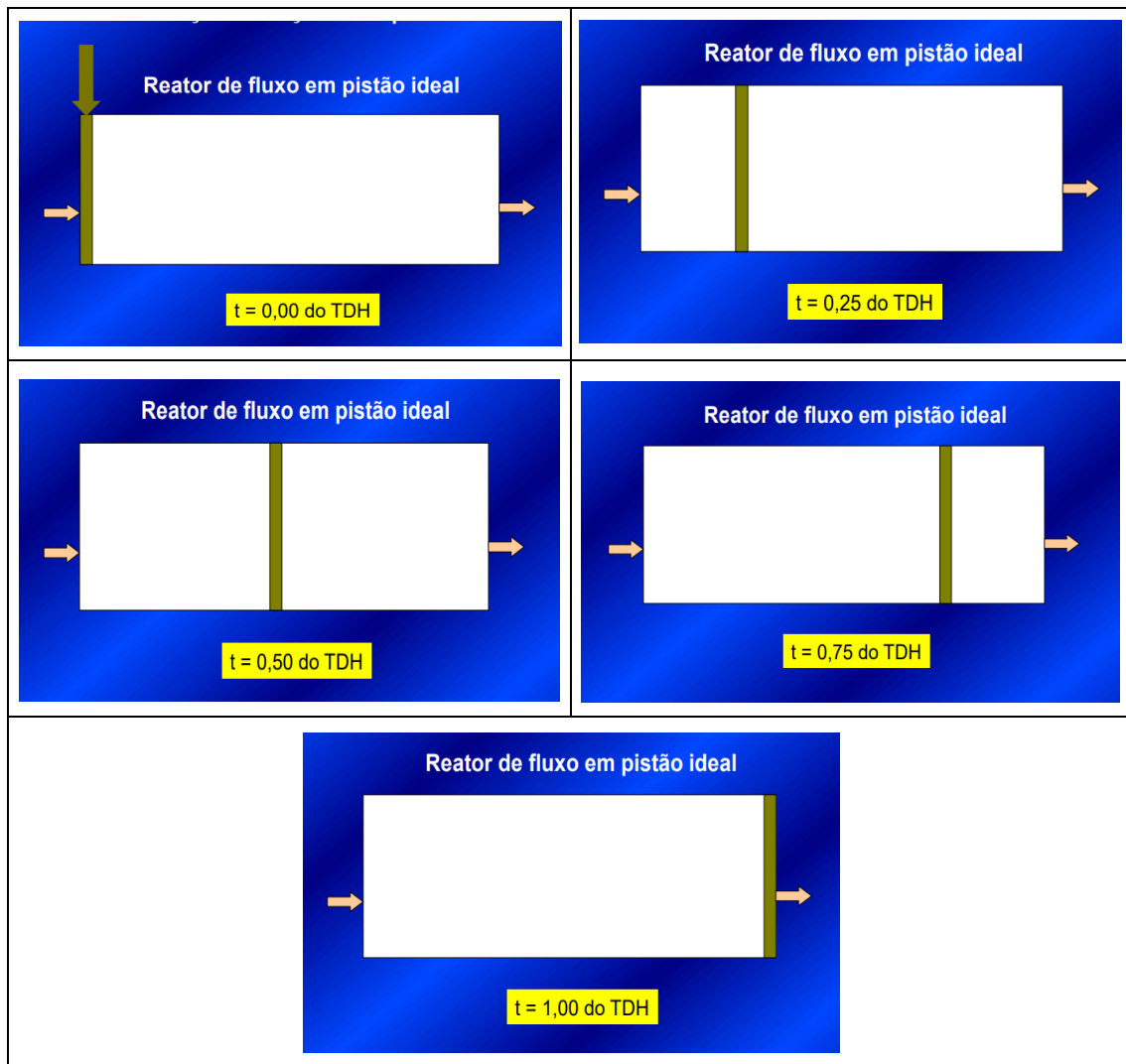
- não afetar o fluxo;
- ser conservativo, permitindo estabelecer balanço de massa;
- ser fácil de ser injetado em um curto período de tempo;
- ser de fácil análise; e
- não reagir com o meio.

3.4 Comportamento Hidrodinâmico

Os reatores que operam com tratamento biológico de efluentes, em sua maioria, não apresentam comportamento hidrodinâmico ideal, mas podem ser considerados, dentro de um limite de erro aceitável, reatores de mistura completa ou de fluxo em pistão ideais (TOSCANI, 2010).

Reatores de fluxo em pistão têm seu escoamento ocorrendo analogamente, sendo observado em um êmbolo, onde as partículas entram de forma contínua no reator e são descarregadas na mesma sequência em que entram, ocorrendo a mínima dispersão longitudinal. Assim, as partículas levam o mesmo intervalo de tempo para percorrer toda a extensão do reator, conforme Figura 2 (TOSCANI, 2010; SIQUEIRA, 1998).

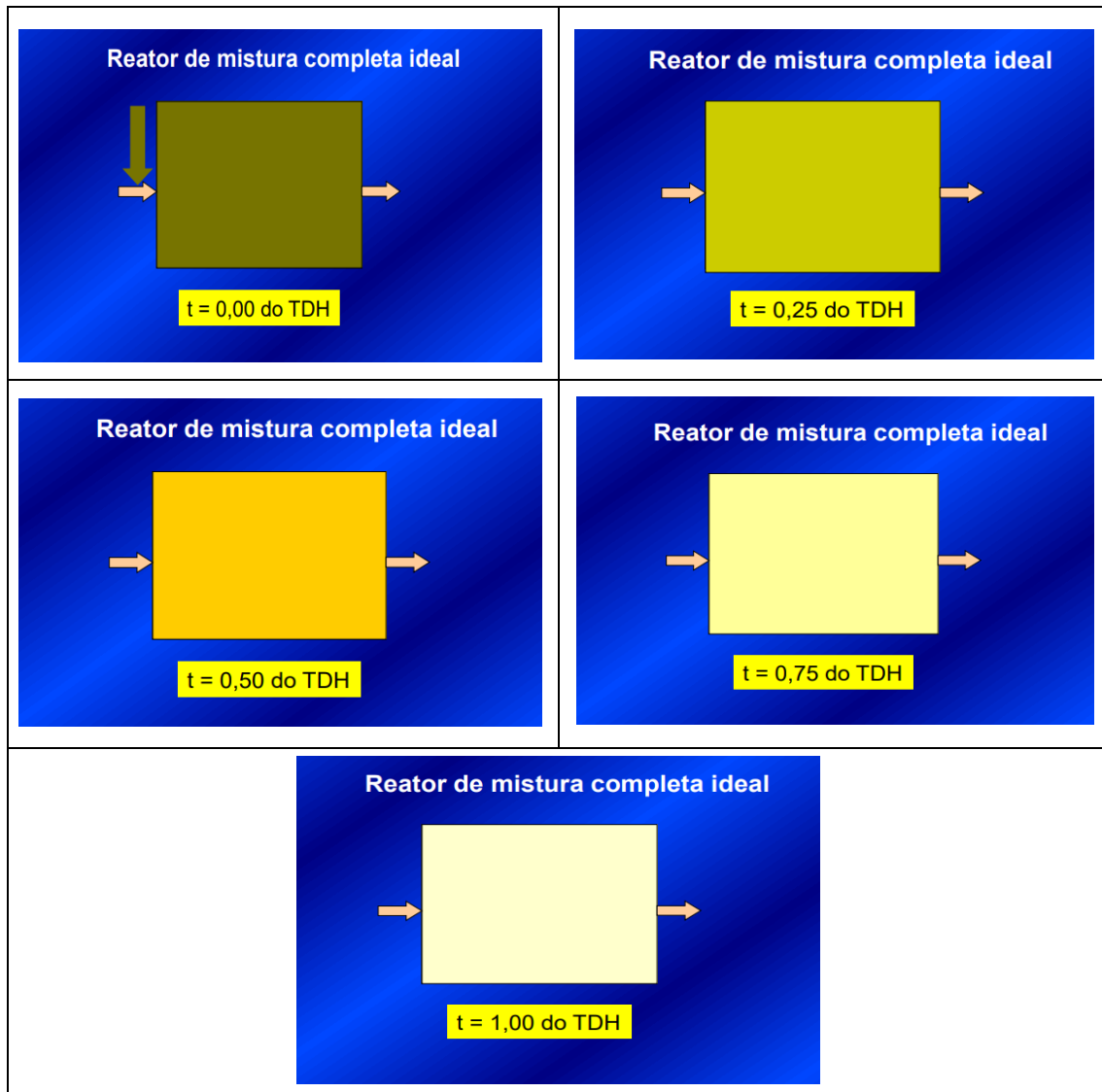
Figura 2 - Sistema de um reator de escoamento em pistão.



Fonte: VON SPERLING (2015).

Os reatores de mistura completa se diferenciam dos reatores de fluxo em pistão devido à máxima dispersão longitudinal. Naquele modelo, as partículas, após entrarem no reator, sofrem dispersão de forma instantânea, e sua saída é proporcional a sua concentração estatística. Segundo Toscani (2010), a concentração em qualquer ponto do reator é igual à concentração do efluente, como pode ser observado na Figura 3. Ocorre assim uma homogeneização, que se dá em todo o reator.

Figura 3 - Sistema de um reator de mistura completa.

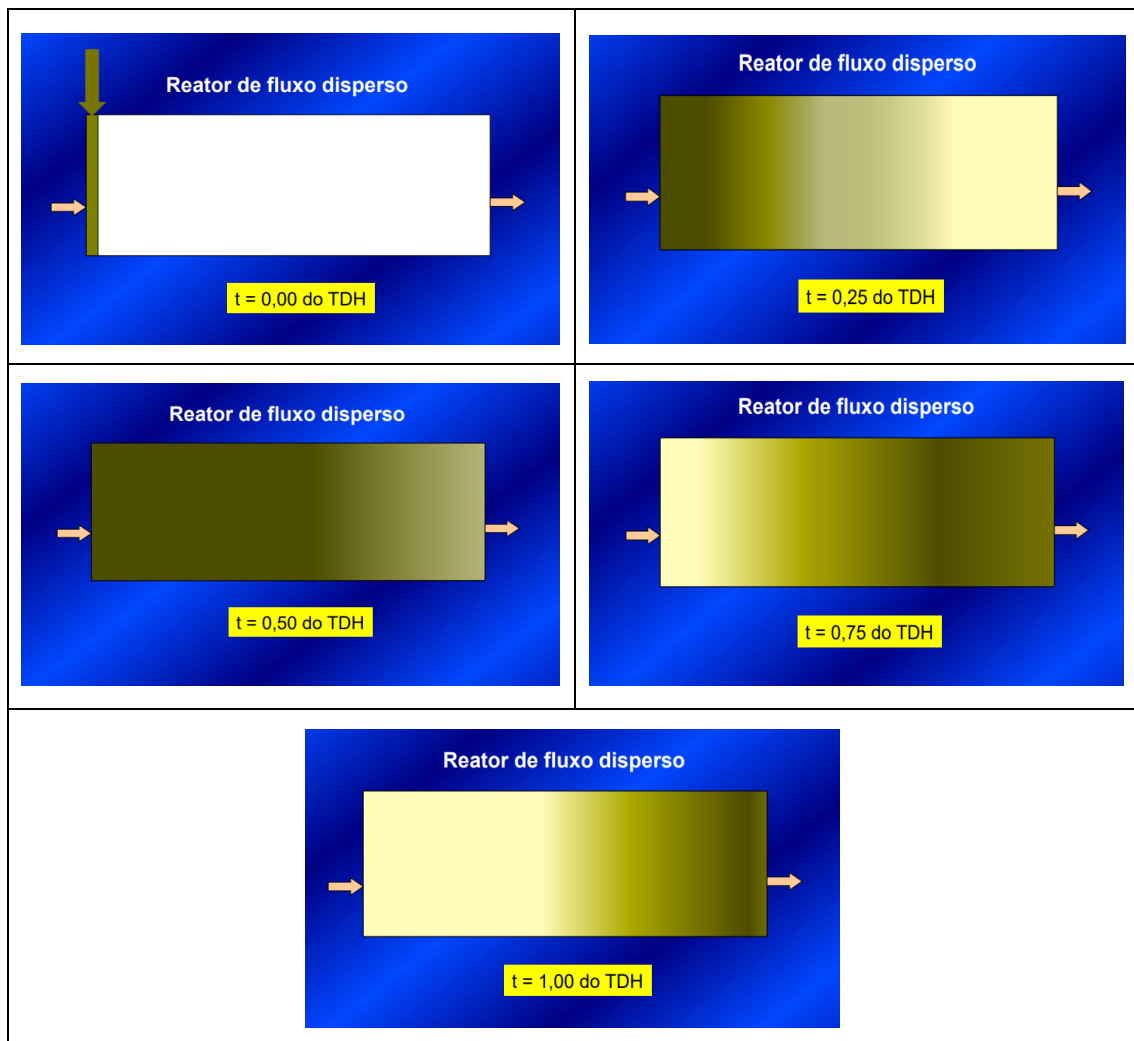


Fonte: VON SPERLING (2015).

Esses regimes de mistura completa e fluxo em pistão dificilmente ocorrem na prática. Desse modo, constitui-se o conceito de fluxo disperso (ou fluxo real, ou ainda fluxo arbitrário), de acordo com o qual há um grau de mistura intermediário, que

corresponde à maioria dos reatores reais. Pode-se exemplificar esse modelo por meio da Figura 4.

Figura 4 - Sistema de um reator de fluxo disperso.



Fonte: VON SPERLING (2015).

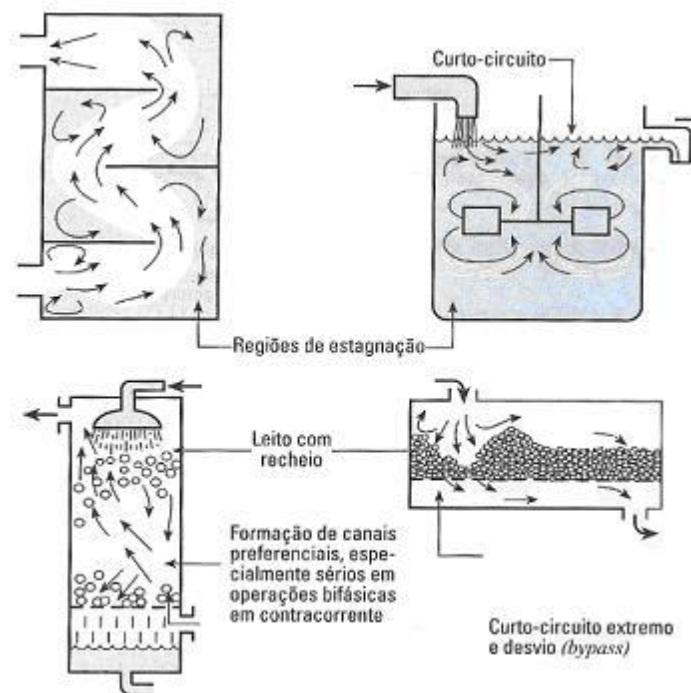
As diferenças entre o regime real e ideal de escoamento podem ser causadas por vários fatores do escoamento (Figura 5), destacando-se: curto-circuito, recirculações, zonas mortas e misturas (METCALF; EDDY, 2015; KADLEC; WALLACE, 2007). Essas características (ou anomalias) do escoamento podem ser conceituadas como:

- Curto-circuito: caminhos preferenciais percorridos pelos sólidos suspensos, o que resulta em um TDH no reator menor que o TDH teórico, conduzindo a uma redução da eficiência de remoção (RIBEIRO, 2007).
- Recirculações: são comportamentos rotacionais dos sólidos suspensos no interior do reator.

- Zonas mortas: são regiões do reator onde o TDH é elevado, em relação ao tempo de detenção teórico, ocorrendo poucas trocas com outras regiões.
- Mistura: espalhamento aleatório do constituinte, que ocorre no volume do reator. Esse espalhamento pode ser influenciado por fatores como: advecção diferenciada, difusão e correntes de densidade.

Os reatores que apresentam esses tipos de anomalias devem ser evitados, pois diminuirão o desempenho da unidade (LEVENSPIEL, 2000).

Figura 5 - Principais problemas de ordem hidráulica identificados em reatores.



Fonte: Levenspiel (2000).

O tempo de detenção hidráulico (TDH) teórico é calculado pela razão entre o volume útil do reator e a vazão do escoamento. Esse tempo representa a permanência de uma partícula no reator, ou seja, da entrada até a saída, se for um regime de pistão ideal. A distribuição desse tempo de detenção (DTR) é denominada curva de passagem, a qual gera o tempo de passagem de parcela do fluido pelo reator, ou seja, o tempo em que o traçador permanece no sistema e as concentrações que deixam o reator (Figura 6 e 7). A partir da DTR, pode-se obter o TDH real (Equação 1) e a variância (Equação 2), que representam o espalhamento do traçador e a variação ocasionada à medida que a substância deixa o reator, respectivamente.

Para a obtenção do TDH real e da variância são utilizadas as equações:

Equação 1

$$\overline{TDH} = TDH_r = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} = \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i}$$

Equação 2

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} - \overline{TDH}^2 = \frac{\sum_i t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} - TDH_r^2$$

Onde:

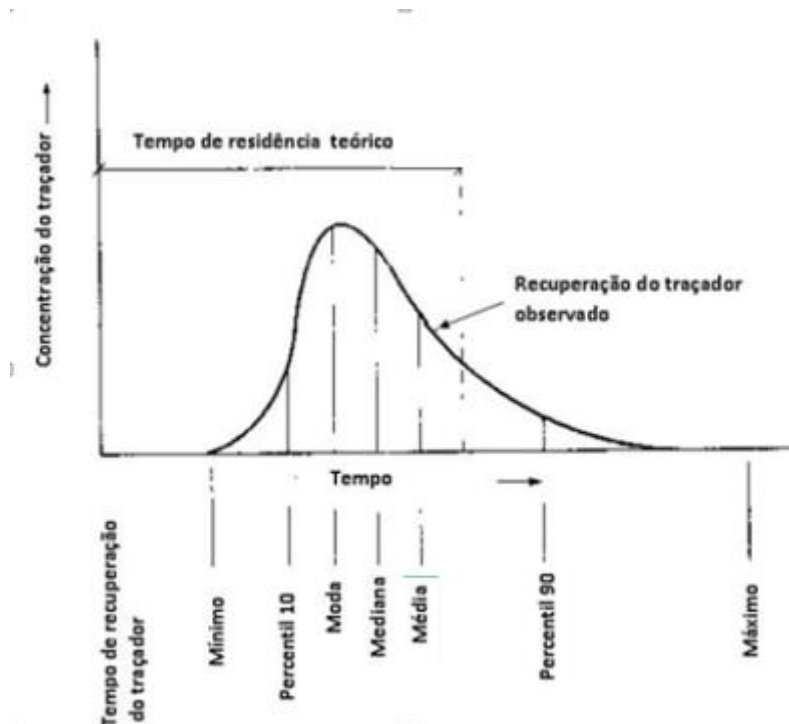
$\overline{TDH} = TDH_r =$ tempo médio ou tempo real;

$t_i =$ tempo associado a cada concentração C_i (h);

$C_i =$ concentração de traçador na saída do reator em cada intervalo de tempo i (mg/L);

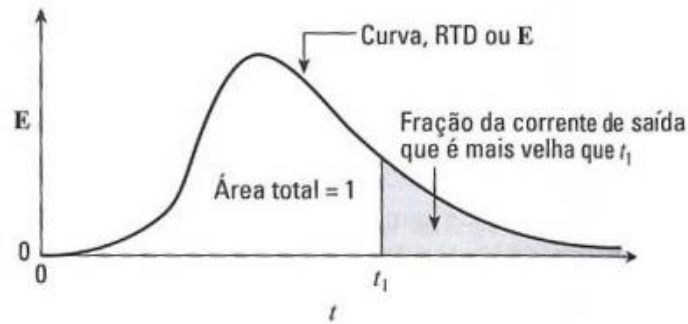
$\Delta t_i =$ intervalo de tempo entre a amostra coletada em t_i e t_{i+1} (h).

Figura 6 - Curva de passagem do traçador.



Fonte: Metcalf e Eddy (2015).

Figura 7 - Curva DTR.



Fonte: Levenspiel (2000).

Para a transformação da curva de passagem do traçador para curva E, faz-se necessária a mudança na escala (Equação 3), visando igualar a área sob a curva igual a 1.

$$E = \frac{C_i}{\sum C} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

E = curva de distribuição de tempo de detenção hidráulico;

C_i = concentração de traçador na saída do reator em cada intervalo de tempo i ;

$\sum C$ = somatório das concentrações de C_i .

A curva DTR também pode ser visualizada se convertermos a curva E para a função E_θ , adimensional. Para isso, utiliza-se a Equação 4.

$$E_\theta = TDH_r \times E \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

TDH_r = tempo de detenção hidráulico real (horas);

E = curva de distribuição de tempo de detenção hidráulico.

Como não há uma normatização específica para o tanque de evapotranspiração, sendo seu dimensionamento feito com base em estudos empíricos, há carência de mais estudos para melhor compreensão do sistema.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada na Universidade Federal de Viçosa, no laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA), do Departamento de Engenharia Civil, no Laboratório de Celulose e Papel e no de Resíduos da Indústria Florestal, ambos do Departamento de Engenharia Florestal. Para condução dos ensaios hidrodinâmicos com emprego de traçadores, realizou-se a montagem de uma planta piloto do sistema individual de tratamento de esgoto por Tanque de Evapotranspiração (TEvap),.

4.1 Montagem do piloto do sistema TEvap

A planta piloto do sistema TEvap consistiu de um tanque de Polipropileno, com o volume de $0,372 \text{ m}^3$, altura de $0,575 \text{ m}$, comprimento de $0,980 \text{ m}$ e largura de $0,655 \text{ m}$, mostrado na Figura 8.

O sistema foi montado com camadas de meio suporte e filtrante, compostas de entulho de construção (substituindo a pedra de mão), brita nº 2, areia grossa e solo, dispostos em composição granulométrica decrescente, no sentido ascendente do tanque. Entre as camadas pedra de mão/brita e brita/areia foi colocada uma tela, com trama capaz de evitar a mistura dos meios filtrantes.

Um tubo de PVC com diâmetro de 100 mm foi instalado na entrada do sistema e conduzido até o fundo do TEvap. Na camada inferior, foi instalado um tubo de PVC (250 mm), simulando a câmara de digestão, com hachuras ao longo de seu comprimento, o que permitiu uma melhor distribuição do efluente e do traçador, como pode ser visto na Figura 9.

Na parte frontal do tanque foram instaladas torneiras em alturas distintas ($T1 = 0,195 \text{ m}$, $T2 = 0,317 \text{ m}$, $T3 = 0,440 \text{ m}$ e $T4 = 0,580 \text{ m}$), para coleta e monitoramento da solução dos traçadores (Figura 9a). As torneiras instaladas simulam extravasores, possibilitando avaliação do comportamento hidrodinâmico de diferentes alturas de material filtrante. Nas laterais do tanque foram instaladas torneiras (Figura 9b) que permitiram monitorar a dissipação do traçador, nos ensaios com TEvap montado com e sem vegetação. Os pontos de coletas $T1$, $T2$, $T3$ e $T4$ estão localizados próximos à saída do TEvap e os pontos de coletas ($PD1$ e $PE1 = 0,175 \text{ m}$, $PD2$ e $PE2 = 0,125 \text{ m}$ e $PD3$ e $PE3 = 0,125 \text{ m}$), localizados próximos à entrada do TEvap.

Figura 8 - Piloto do tanque de evapotranspiração.

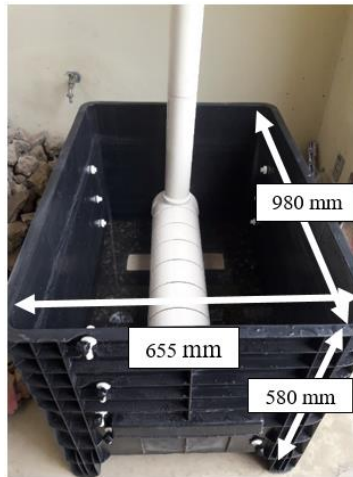
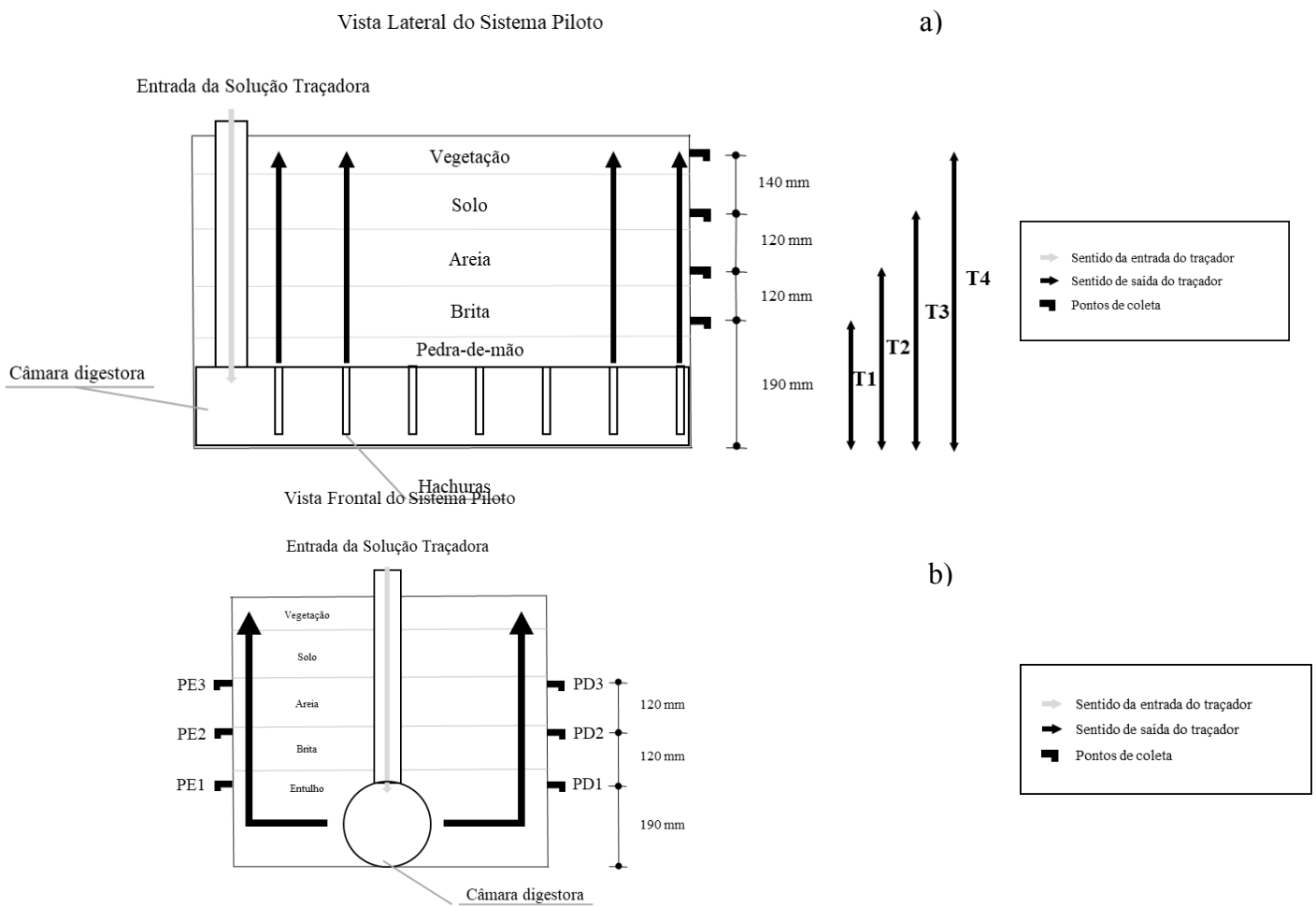


Figura 9 a) e b) - Esquema do fluxo do traçador no tanque de evapotranspiração.



4.2 Caracterização do Meio Filtrante

Os materiais utilizados como meio filtrante do TEvap foram caracterizados obedecendo às metodologias propostas pela NBR NM 30 (ABNT, 2001), NBR NM 53 (ABNT, 2002), NBR NM 45 (ABNT, 2006), e NBR NM 248 (ABNT, 2006), que tratam dessas determinações em agregados para concreto. Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Engenharia Civil (LEC), da Universidade Federal de Viçosa.

A distribuição granulométrica de cada camada pode ser vista no gráfico do ensaio granulométrico da Figura 10. A pedra de mão (entulho de construção civil), utilizado como uma das camadas, possuía em média 30 mm de comprimento, 15 mm de largura e 15 mm de altura. A areia lavada utilizada possuía 59% de espaços vazios, já a brita, 50% de espaços vazios, e a pedra de mão possui 48% de espaços vazios.

O solo utilizado foi Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), com textura argilosa, coletado de uma área do Tiro de Guerra 04-027, Viçosa-MG. As propriedades do solo são apresentadas na Figura 11.

Figura 10 - Ensaio Granulométrico dos meios filtrantes utilizados no preenchimento do TEvap.

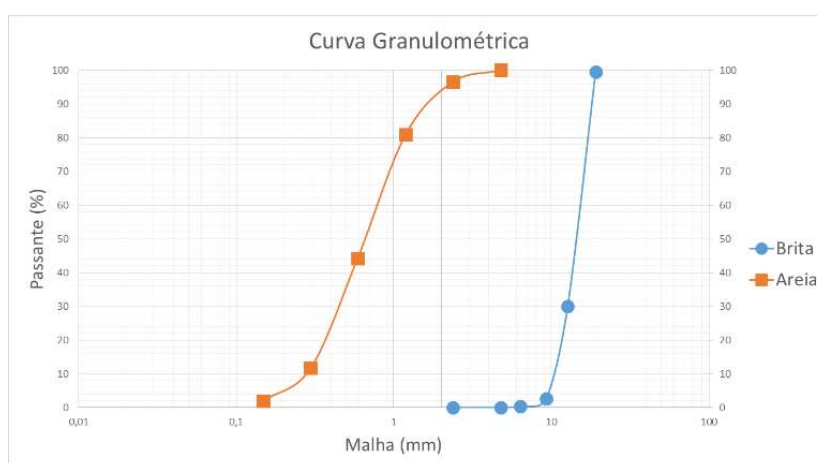


Figura 11 - Características físicas e químicas do horizonte A e B do solo.

Horizontes	pH em água	Teor de argila dag.kg ⁻¹	Matéria orgânica dag.kg ⁻¹	CTC _{efetiva} Cmol.kg ⁻¹
A	5,5	63,0	5,71	2,32
B	5,0	72,0	3,02	0,94

Fonte: Lo Monaco *et al.* (2012).

4.3 Etapas Experimentais

4.3.1 Vazão adotada

A vazão de entrada foi definida considerando-se a proporção do volume do sistema piloto em relação ao de um sistema em escala real. A proporção de redução foi de aproximadamente um quarto. Aplicando os valores de geração de águas fecais relatadas por Rebouças *et al.* (2007), para fins de cálculo, adotou-se nesta pesquisa o valor de vazão de 14 L/h, dividido em dois pulsos de 7 litros a cada 30 minutos. A solução traçadora foi inserida no primeiro pulso realizado.

4.3.2 Etapa 1

Na Etapa 1, o sistema TEvap operou com os meios filtrantes de forma individualizada, ou seja, cada camada foi estudada de forma separada, exceto o solo, pois a altura de sua camada depende da vegetação a ser utilizada no experimento. O sistema estava saturado durante o ensaio. O traçador que apresentou a melhor resposta na primeira etapa foi utilizado para realizar os ensaios hidrodinâmicos da segunda etapa.

4.3.3 Etapa 2

A segunda etapa consistiu do piloto montado com todos os meios filtrantes, operados com a presença e a ausência de vegetação, quando se observou a interferência desta nas características hidrodinâmicas do sistema e na dissipação do traçador. As camadas de substrato foram arranjadas com as seguintes alturas: 0,18 m de pedra de mão, 0,12 m de brita, 0,12 m de areia e 0,140 m de solo. A coleta foi realizada apenas na saída, que corresponde à torneira instalada para a altura T4 (0,580 m).

Nesta etapa, no sistema plantado, a vegetação definida foi a taioba (*Xanthosoma sagittifolium*), pelas suas características de crescimento relativamente rápido e seu uso já consagrado nesse tipo de sistema. Foi esperado um período de dois meses para adaptação das mudas, antes de se iniciar os ensaios com traçadores, e mais um mês para avaliação do sistema em diferente estágio de crescimento. Foram plantadas seis mudas de taioba no TEvap, com as distâncias de 25 x 50 cm uma da outra.

Na Etapa 2, foi monitorada a formação da pluma do traçador, nos ensaios sem vegetação e com vegetação (trinta dias após o plantio), com o auxílio do *software* MINITAB. Nas laterais do tanque as torneiras instaladas do protótipo (Figura 9) permitiram monitorar a dissipação do traçador. Os pontos de coleta T1, T2, T3 e T4 estão

localizados próximos à saída do TEvap e os pontos de coleta (PD1 e PE1 = 0,190 m, PD2 e PE2 = 0,310 m e PD3 e PE3 = 0,430 m), localizados próximos à entrada do TEvap.

As duas etapas foram conduzidas em ambiente fechado (sem as adversidades climatológicas, como chuva, efeito da evaporação, variações de temperaturas, etc.) e com aplicação de água potável da rede de abastecimento público.

4.4 Ensaios Hidrodinâmicos

4.4.1 Definição dos Traçadores

Os estudos hidrodinâmicos foram realizados pela técnica estímulo-resposta, utilizando os traçadores cloreto de sódio (NaCl) e rodamina B, injetados concomitantemente. O TDH foi obtido utilizando-se a Equação 1. O NaCl foi adotado por causa de sua facilidade de obtenção e de monitoramento, que nesse estudo foi realizado por meio de um condutivímetro (marca AKSO®, modelo AK88).

$$\overline{TDH} = TDH_r = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} = \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} \quad \text{Equação 1}$$

A rodamina B foi adotada por sua fácil leitura em espectrofotômetro (marca Hach® VIS, modelo DR 2800). O comprimento de onda da rodamina B para leitura é de 554 nm. Para definir a concentração de rodamina B, foram realizados ensaios preliminares, uma vez que os valores apresentados em estudos prévios com traçadores (2 mg/L de rodamina WT e fluoresceína sódica) (BORGES *et al.*, 2009) não se adequaram ao experimento. Com os resultados obtidos, optou-se por realizar os ensaios com 20 mg/L de rodamina B.

A partir das leituras das absorvâncias, foi obtida a curva de concentração do traçador (mg/L), por meio de soluções-mãe de concentrações conhecidas, em que foram medidas suas absorvâncias no comprimento de onda de absorção máxima, contra o “branco” de água deionizada. Com auxílio do *software* Microsoft Excel®, obteve-se a equação de correlação ($R^2 = 0,9924$) entre a absorvância e a concentração do traçador, apresentada na Equação 5.

$$y = 0,3727x + 0,0155$$

Equação 5

Em que:

x = absorvância (nm);

y = concentração do traçador (mg/L). A concentração da solução do traçador salino NaCl foi de 20 g NaCl/L. A concentração do NaCl foi determinada utilizando-se a equação de calibração ($R^2 = 0,9943$), Equação 6, com o condutivímetro citado. Nos valores de condutividade medidos (CE_{med}) devem ser descontados aqueles valores encontrados no meio (*background*), para se encontrar a concentração de NaCl.

$$[NaCl] = 0,2611 \times (CE_{med} - CE_{back}) \times 0,7471$$

Equação 6

Onde:

NaCl = concentração de NaCl (mg/L);

CE_{med} = condutividade elétrica medida ($\mu S/cm$);

CE_{back} = condutividade elétrica medida antes da adição do traçador ($\mu S/cm$).

Com base nos resultados da Etapa 1, definiu-se o traçador que apresentou o melhor desempenho para determinar os parâmetros hidrodinâmicos (Tabela 1) a serem utilizados na Etapa 2.

4.4.2 Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos

Os ensaios hidrodinâmicos com os traçadores foram realizados com água potável com injeção em pulso, sendo que o pulso deve ser inferior a 2% do tempo de detenção hidráulica (TDH teórico), conforme descrito por BRACHO; BRISSAUD; VASEL, 2009; METCALF; EDDY, 2015; KADLEC e WALLACE, 2007. Foi realizada uma coleta de amostra a cada 60 minutos por um período de 48 horas.

Com os resultados dos ensaios com os traçadores, foi elaborada a curva de distribuição da concentração ao longo do tempo, de acordo com Levenspiel (2000). Posteriormente, foi determinado o Índice de Dispersão de Morril (IDM), o Índice do Tempo de Retenção Médio (ITRM) ou Eficiência Volumétrica (ev), eficiência hidráulica (λ), coeficiente de dispersão e percentual de recuperação do traçador, conforme equações apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 - Equações para determinar Índice de Dispersão de Morril, Índice do Tempo de Retenção Médio e Eficiência Hidráulica.

Parâmetros	Equações	Significado
^{1,2} IDM	T_{90}/T_{10}	T_{90} : tempo que 90 % do traçador já passou pela unidade; T_{10} : tempo que 10 % do traçador já passou pela unidade.
² ITRM ou ev	T_m/TDH	T_m : tempo médio de residência; TDH: tempo de detenção hidráulico nominal.
³ Eficiência Hidráulica (λ)	t_p/TDH	T_p : tempo de pico do traçador; TDH: tempo de detenção hidráulico nominal.
⁴ Coeficiente de dispersão	$\sigma_{\theta}^2 = 2d - 2d^2 (1 - e^{-\frac{1}{d}})$ $\sigma_{\theta}^2 = 2d - 3d^2$	σ_{θ}^2 : variância padronizada e: número neperiano d: número de dispersão
⁵ Recuperação do traçador	$rec = (\sum [\text{traçador}] * V) / M_{adic}$	rec: recuperação do traçador (%) $\sum [\text{traçador}]$: somatório das conc. do traçador V: volume de saída M_{adic} : massa adicionada

Fonte: 1: Thackston; Shields; Schoroeder (1987); 2: Metcalf; Eddy (2015); 3: Persson; Somes; Wong (1999); 4: Levenspiel (2000); 5: adaptado de Matos *et al.* (2015).

4.4.3 Verificação de Zonas Mortas e Índice de Curto-Circuito

O volume de zonas mortas foi calculado de acordo com metodologia reportada por Peña, Mara e Avella (2006), com base nos valores de TDH teórico e médio; este último obtido a partir dos ensaios hidrodinâmicos e do volume real do sistema. O índice de curto-circuito foi verificado pela relação entre o tempo do primeiro aparecimento do traçador na solução do reator e o TDH teórico, de acordo com metodologia descrita por Metcalf e Eddy (2015). As equações necessárias para o cálculo de zonas mortas e curto-circuito estão descritas na Tabela 2.

TABELA 2 - Equações para determinação da presença de zonas mortas e índice de curto-circuito.

Parâmetros	Equações	Significado
	$\beta = \frac{TDH_r}{TDH_t}$	β : relação entre o TDH real e o TDH teórico;
¹ Zonas Mortas	$V_a = V_t \times \beta$	V_a : Volume ativo do reator; V_t : Volume total do reator;
	$V_d = V_t - V_a$	V_d : volume de zonas mortas
² Índice de Curto-Circuito	T_i/TDH	T_i : tempo no qual o traçador começa a aparecer TDH: tempo de detenção hidráulico nominal

Fonte: 1: Peña; Mara; Avella (2006); 2: Metcalf; Eddy (2015).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes com traçadores são apresentados graficamente por meio de curvas respostas (Concentração x Tempo). Por meio deles foi possível determinar o tempo de detenção hidráulica, a eficiência hidráulica e volumétrica, o Índice de Dispersão de Morril, o número de dispersão, a massa de traçador recuperado, o volume de vazios e o índice de curto-circuito do sistema analisado.

5.1 Etapa 1

Os resultados da Etapa 1 são apresentados conforme análise individual dos meios filtrantes e comparação das alturas de um meio filtrante com o outro.

5.1.1 Operação com meios filtrantes

A Figura 12 apresenta as curvas respostas dos ensaios realizados com os meios filtrantes (pedra de mão, brita e areia) com as alturas T1 (0,195 m), T2 (0,317 m), T3 (0,440 m) e T4 (0,580 m), utilizando rodamina B e NaCl.

As curvas (a) e (b) da Figura 12 mostram o primeiro ensaio realizado com a aplicação da rodamina B e do NaCl, em meio filtrante pedra de mão. As retas que interceptam as curvas respostas correspondem aos pontos dos tempos de detenção hidráulica médios de cada curva. Os tempos de detenção utilizando NaCl, para pedra de

mão, foram de aproximadamente 22 horas, exceto na altura T1. Na brita, os TDHs ficaram entre 21 e 23 horas. Na camada de areia, a alturas T1, T2, T3 e T4 apresentaram os valores de 6,8 9;12,15 e 23,44 horas, respectivamente. Os tempos de detenção encontrados utilizando rodamina B ficaram todos entre 22 e 24 horas, para todos os meios filtrantes.

Nos gráficos da Figura 12, o tempo de TDH médio da altura T1 (gráfico (a)) foi o único que diferiu dos demais, 22 horas e 16 horas, sendo esta diferença de dois dias para rodamina B e cinco dias para o NaCl. As alturas T2, T3 e T4 apresentaram uniformidade em seus comportamentos, o que indica que são iguais as concentrações nas diferentes alturas e mostra que o traçador se distribuiu de forma igual. Destaca-se ainda que a rodamina B apresentou baixa mobilidade no sistema de fluxo ascendente.

Nas curvas respostas geradas com NaCl, o comportamento foi diferente da rodamina B. Os maiores picos encontrados foram na altura T1 (0,190 m) tanto para o cloreto de sódio, quanto para a rodamina B. Os valores de TDHs médios com NaCl foram menores que os obtidos com rodamina B, sendo esta redução mais característica na altura T1. Esses resultados podem ser correlacionados com o índice de dispersão de Morrill (IDM) e o índice do tempo de retenção média (ITRM) (Tabela 7), que foram maiores nos resultados obtidos com a rodamina B. Isto se dá pois esse traçador fica mais tempo retido no sistema, o que pode ser comprovado pela presença de grande quantidade de rodamina dissolvida na camada de pedra de mão, cuja amostra foi retirada quando o meio ainda estava saturado. Este fato pode ser observado na Figura 13.

FIGURA 12 - Curvas respostas utilizando rodamina B e NaCl nos meios filtrantes pedra de mão, brita e areia.

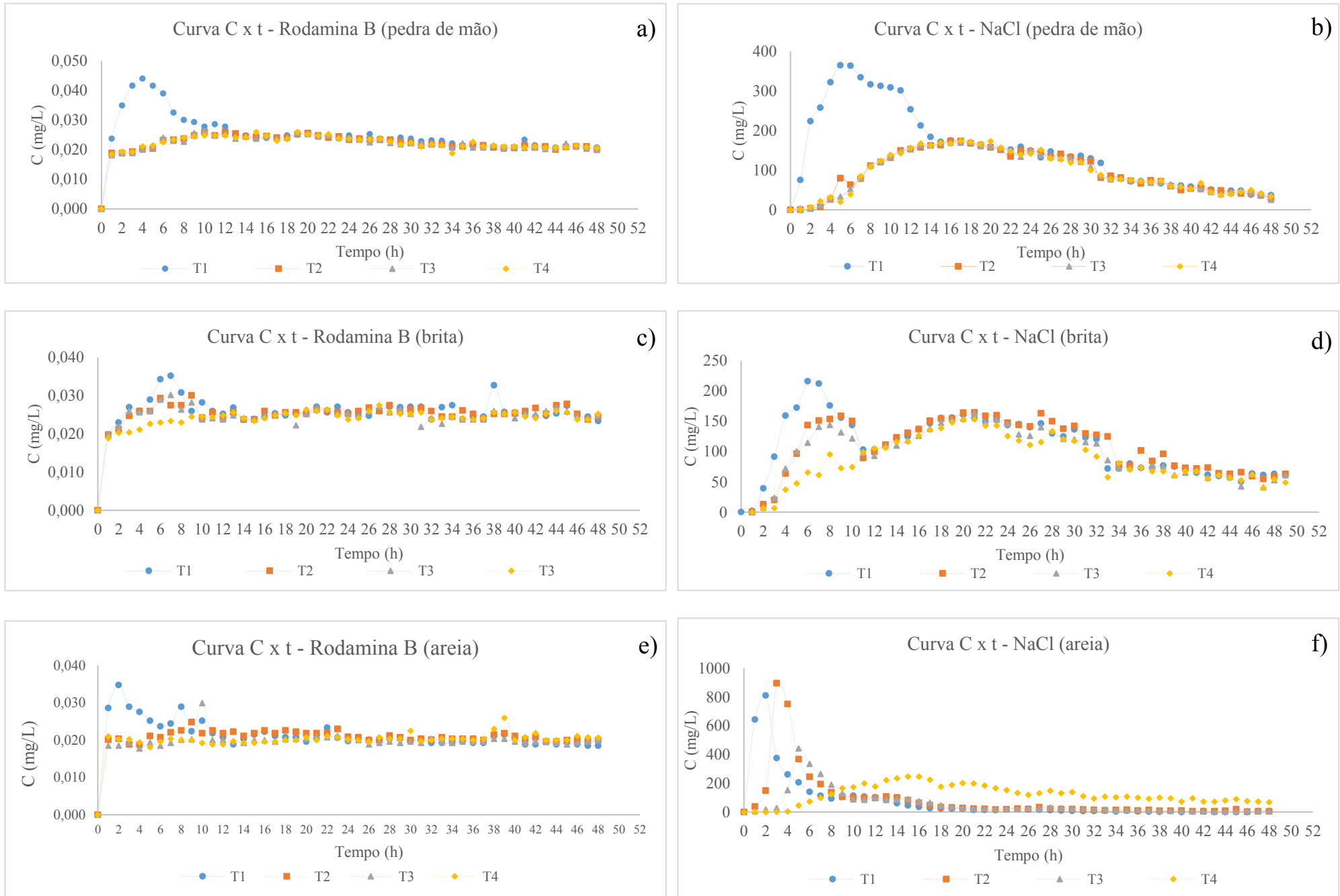


Figura 13 - Registro fotográfico da retida do meio filtrante e presença de rodamina B estagnada no fundo.



No ensaio realizado com brita, utilizando rodamina B, os tempos de detenção médios foram de 24 horas, como pode ser observado nos gráficos da Figura 12 (c) e (d). O comportamento das curvas respostas utilizando rodamina B em todos os meios filtrantes apresentaram certa semelhança entre si, fato que pode ter ocorrido devido à estagnação da rodamina B no fundo do tanque e pela sua dispersão lenta, à medida que as descargas foram realizadas. Esse comportamento foi observado em todos os ensaios conduzidos com rodamina B, o que indica que, em sistemas de fluxo ascendente, a

rodamina B possui tendência a se estagnar, apresentando possíveis dificuldades para recuperação.

Estudos realizados com rodamina WT, traçador fluorescente, indicam que em ambientes naturais, dependendo das concentrações iniciais, do tipo de sedimento e da matéria orgânica, pode ocorrer sorção do traçador (TRUDGILL, 1987; EVERTS; KANWAR, 1994). Como o traçador se despreendeu do meio filtrante, supõe-se que não ocorreu sorção. Considerando que a rodamina B tem densidade maior que a da água ($1,31 \text{ g/cm}^3$), acredita-se que a concentração de entrada tenha sido alta, o que fez com que o traçador estagnasse no fundo do tanque. A baixa vazão utilizada (14 L/h) pode ter contribuído para esta ocorrência. As altas concentrações necessárias para atingir um pico de concentração significativo resultam em efeitos na densidade do pulso do traçador (PASSOS *et al.*, 2018; HEADLEY; KADLEC, 2007)

Nos ensaios com NaCl, as alturas T1 e T4 apresentaram TDH médios distintos, sendo 16,93 (pedra de mão), 21,50 (brita) e 6,83 (areia) para T1 e 22,60 (pedra de mão), 23,55 (brita) e 23,44 (areia) para T4. As concentrações das alturas apresentaram oscilações durante o período monitorado, sendo que a altura T1 foi a que apresentou o maior pico (acima 200 mg/L). O TDH foi igual nas alturas T2 e T3, 22 horas.

Quando se analisam os gráficos (e) e (f) na Figura 12, pode-se perceber que as curvas respostas foram as que apresentaram maiores diferenças entre o comportamento da rodamina B e do NaCl. Assim, como nos outros ensaios, a curva da rodamina B apresentou estagnação no fundo do tanque piloto, sendo que, ao longo da coluna, os valores foram similares ($\sim 0,020 \text{ mg/L}$). As curvas respostas do NaCl apresentaram o efeito de cauda, nas alturas T1, T2 e T3, em que se pode observar um decaimento exponencial.

O efeito de cauda foi observado nas alturas T1 (pedra de mão) e T1, T2 e T3 (areia), nas quais o traçador apresentou um pico bem característico e um posterior decaimento, até que sua concentração ficasse constante. Esse fenômeno se dá a partir da lenta mobilidade do traçador no meio poroso, pois esse estagna em regiões do meio filtrante (NARDI; ZAIAT; FORESTI, 1999). Vários autores registraram a ocorrência desse fenômeno (BORGES *et al.*, 2009; MATOS *et al.*, 2015; BAETTKER, 2015; COSTA, 2016; MAGALHÃES FILHO, 2013). O efeito de cauda na resposta inicial indica a presença de curto-circuito e de zonas mortas, as quais podem estar localizadas nos cantos dos sistemas (ANDRADOTTIR; NEPF, 2000).

Segundo Costa (2016), a variação da condutividade elétrica durante os ensaios pode ser decorrente da fixação pelo substrato, da retirada pelas plantas, da incorporação nas células microbianas ou da precipitação pluviométrica. Como nesses ensaios não havia presença de plantas, efluentes ou exposição às condições climáticas, a variação da CE pode ser atribuída aos substratos utilizados (brita). Levenspiel (2000) e Santiago (2008) relatam que esse tipo de comportamento de variação da condutividade é característico de escoamento com recirculação interna.

Os resultados de cada variável temporal podem ser observados na Tabela 3. Nota-se que os valores de TDH médio são maiores que os teóricos em todos os casos. Resultado semelhante foi encontrado no trabalho de Costa (2016), estudando sistemas alagados construídos (SACs), utilizando cloreto de lítio (LiCl), e Passos *et al.* (2018), utilizando NaCl para avaliar lagoas de maturação.

Tabela 3 - Variáveis temporais obtidas nos ensaios hidrodinâmicos com os meios filtrantes.

Traçador	Altura	TDH teórico (h)	TDH médio (h)	σ^2 (min)	T ₁₀ (h)	T ₉₀ (h)
NaCl	Pdm - T1	4,20	16,93	137,91	3,56	34,23
	Pdm - T2	6,84	22,42	113,82	8,79	37,68
	Pdm - T3	9,48	22,52	112,49	9,10	37,83
	Pdm - T4	12,49	22,60	114,05	9,19	38,14
	Brita - T1	4,47	21,50	150,42	5,36	39,12
	Brita - T2	7,27	22,68	142,42	6,28	39,59
	Brita - T3	10,08	22,31	140,93	6,14	39,36
	Brita - T4	13,29	23,55	130,34	8,42	40,12
	Areia - T1	5,18	6,83	62,17	0,57	15,70
	Areia - T2	8,44	9,05	80,65	2,24	20,87
	Areia - T3	11,70	12,15	84,78	4,17	26,59
	Areia - T4	15,42	23,44	127,79	8,44	40,38
Rodamina B	Pdm - T1	4,20	22,13	198,31	3,51	42,13
	Pdm - T2	6,84	24,07	182,05	5,44	42,74
	Pdm - T3	9,48	24,10	182,31	5,44	42,83
	Pdm - T4	12,49	24,10	182,98	5,36	42,83
	Brita - T1	4,47	24,22	191,21	5,02	42,99
	Brita - T2	7,27	24,59	189,45	5,17	43,21
	Brita - T3	10,08	24,45	191,65	5,02	43,22
	Brita - T4	13,29	24,97	185,08	5,59	43,28
	Areia - T1	5,18	22,90	200,53	3,39	42,52
	Areia - T2	8,44	24,20	188,11	5,08	43,91
	Areia - T3	11,70	24,41	189,29	5,10	43,08
	Areia - T4	15,42	24,83	191,98	4,91	42,24

Pdm: pedra de mão; σ : variância; T1 = 0,195 m; T2 = 0,317 m; T3 = 0,440 m; T4 = 0,580 m.

A ocorrência desta diferença entre o TDH teórico e médio se dá devido à evapotranspiração, que remove parte da água contida no meio. No caso desta etapa do estudo, não se pode atribuir a responsabilidade dessa ocorrência à evapotranspiração e evaporação, pois não havia plantas no piloto e o ambiente ser controlado (BOWMER, 1987; U.S. EPA, 1988; COSTA, 2016). Esses valores de TDH médio podem ser consequência da estagnação dos traçadores no fundo do TEvap, o que aumentaria o tempo em que eles permanecem no interior do sistema. Alguns autores atribuem essa ocorrência às anomalias presentes no sistema, como por exemplo, aprisionamento do traçador em zonas mortas (NARDI; ZAIAT; FORESTI, 1999; BORGES *et al.*, 2009).

Os dois traçadores apresentaram resultados diferentes para o mesmo meio filtrante, uma vez que ocorreu grande estagnação de rodamina B, que a levou a ficar mais tempo no interior do piloto. Essa diferença fica mais evidente quando se comparam os resultados de rodamina B e NaCl na areia, onde os valores das alturas T1, T2 e T3, com NaCl, foram menores do que a metade dos resultados obtidos com rodamina B. Os demais TDHs ficaram acima de 20 horas (exceto em T1, com pedra de mão).

Em situações ideais, o traçador seria eliminado no TDH teórico, tendo seu escoamento pistonado ideal. Segundo Levenspiel (2000), à medida que seu fluxo se distancia do pistonado, aproxima-se do regime de mistura completa. Costa (2016) e Grismer, Tausendschoen e Shepherd (2001) atribuem o caso de redução do TDH médio à redução do volume útil, uma vez que, operando com efluente, tem-se o crescimento do biofilme. Com este crescimento, ocorre a intensificação dos caminhos preferenciais e o aumento dos valores relacionados ao índice de curto-circuito.

5.1.2 Comparação das alturas dos meios filtrantes

A comparação individual entre as alturas das camadas em cada meio filtrante (Figuras 14 e 15) constata que as concentrações de rodamina B são similares. Já os ensaios com cloreto de sódio indicam que nas alturas T1 (0,195 m), T2 (0,317 m) e T3 (0,440 m) o tempo de detenção médio da areia é relativamente menor que o da pedra de mão e o da brita. As três primeiras alturas apresentam valores de pico evidentes, confirmando o efeito de cauda. Ao se comparar os três meios filtrantes, apenas na altura T4 (0,580 m), os testes utilizando o NaCl como traçador obtiveram valores aproximados de TDH médios.

Com base nas curvas respostas com rodamina B, assim como nas análises dos meios filtrantes, observa-se que o comportamento em todas as alturas foi muito similar, sendo todos os TDHs iguais em T2, T3 e T4. Esse fato comprova a questão levantada sobre a estagnação da rodamina B, visto que sua maior concentração se dá no fundo do TEvap e no restante do piloto a concentração se mostra mais baixa e homogênea.

Mesmo com a estagnação da rodamina B, o TDH na altura T2, nos meios filtrantes, apresentaram resultados similares ao do NaCl, sendo os de rodamina B acima de 24 horas e os de NaCl de 22 horas, exceto a areia que apresentou o valor de 8 horas. A altura T3 apresentou o mesmo comportamento que a T2.

Na altura T4 foi onde os TDHs apresentaram os resultados mais similares para todos meios filtrantes, variando de 22 a 24 horas, mesmo com o comportamento das curvas se apresentando diferentes.

Figura 14 - Comparação das curvas respostas dos traçadores nos meios filtrantes nas alturas T1 e T2.

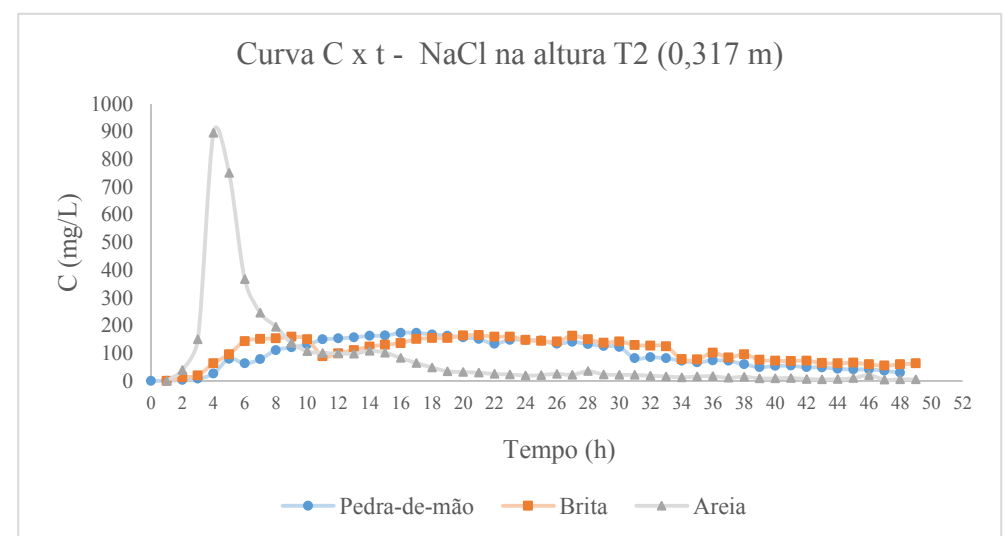
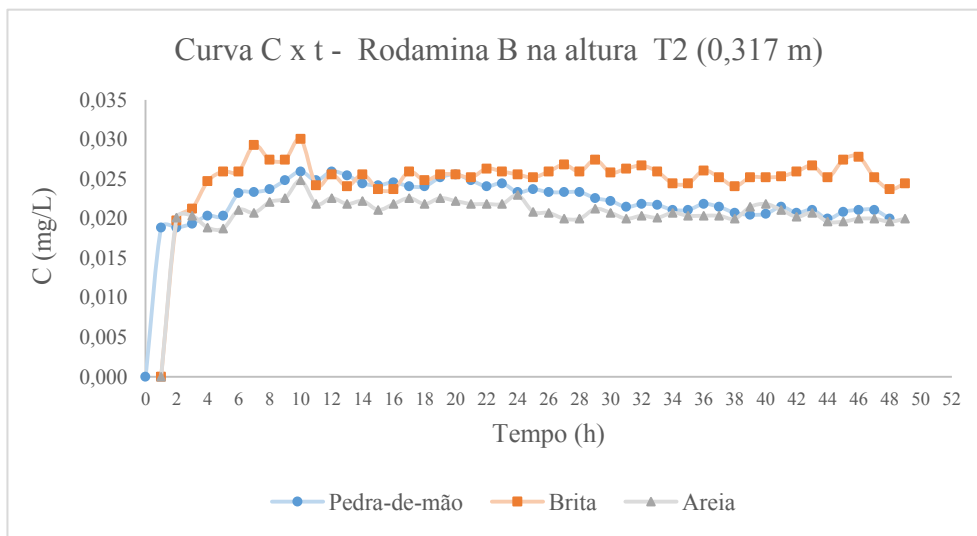
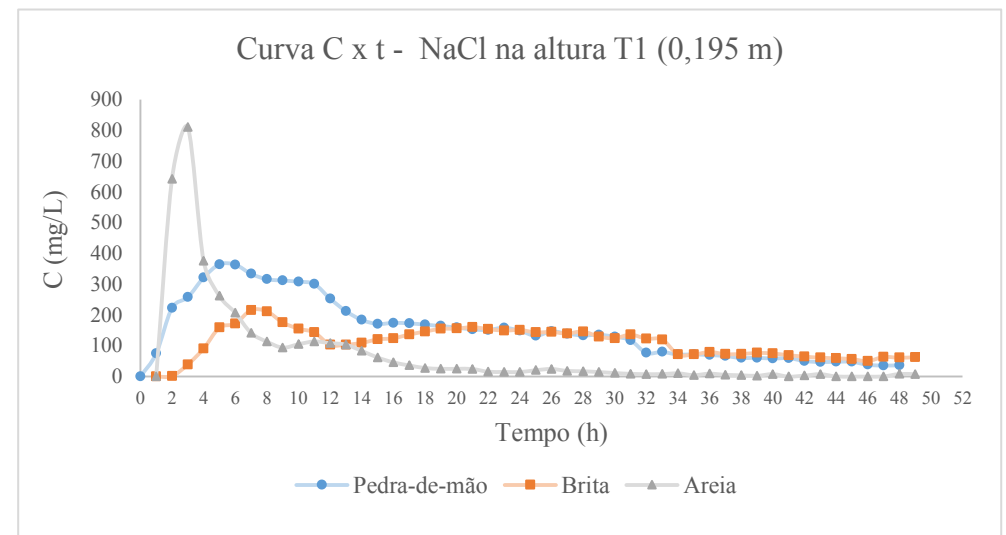
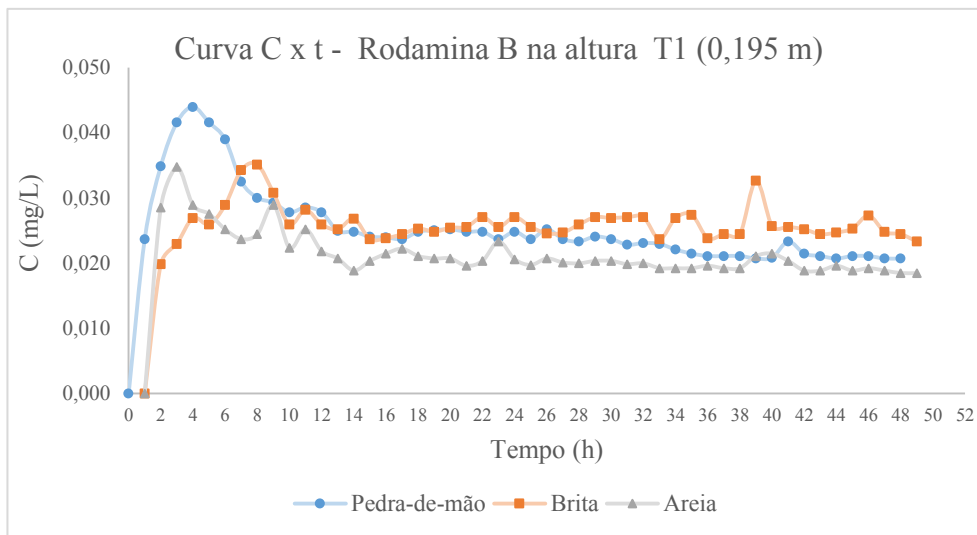
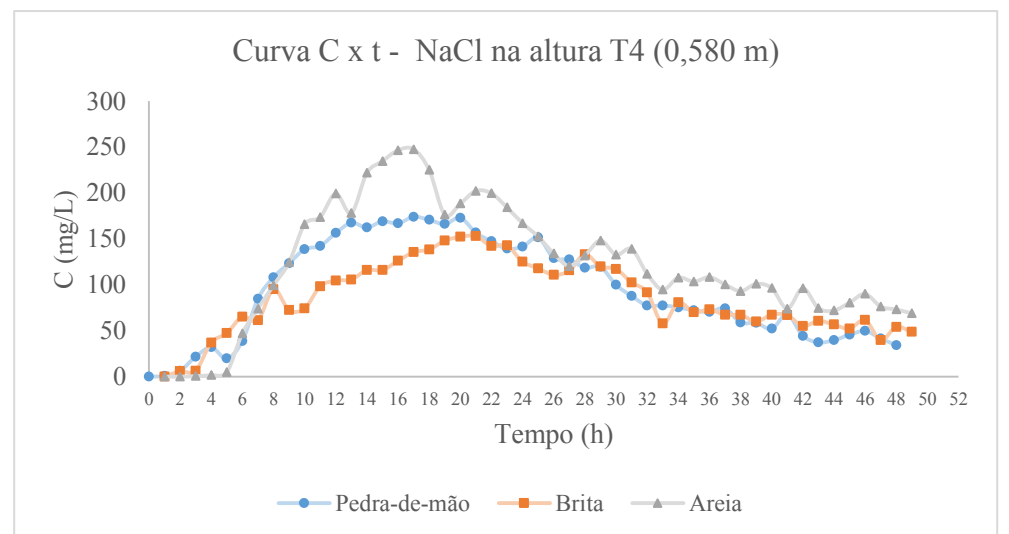
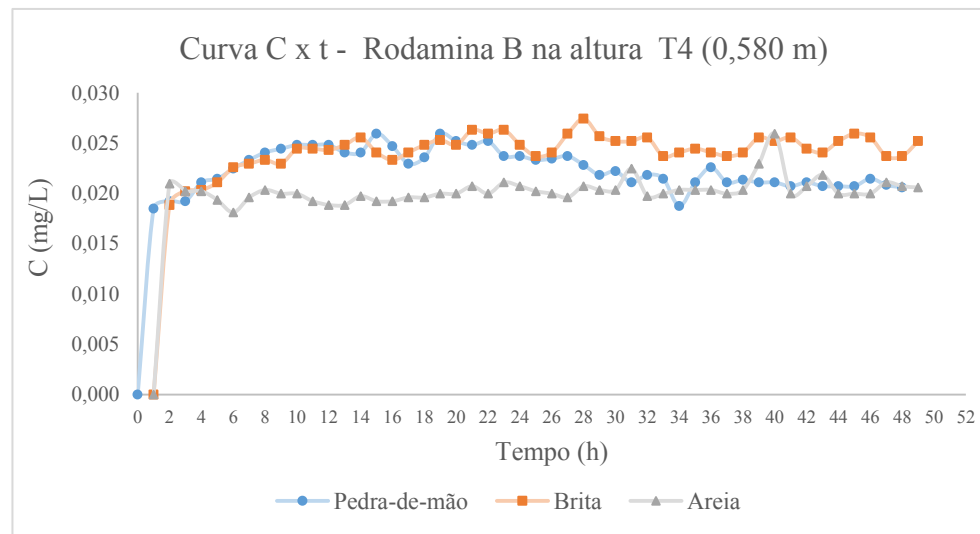
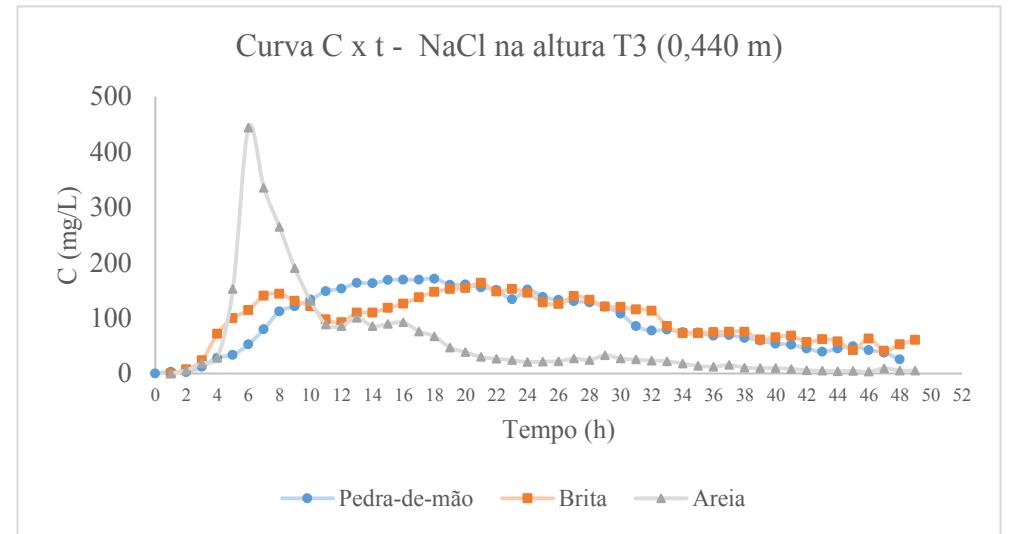
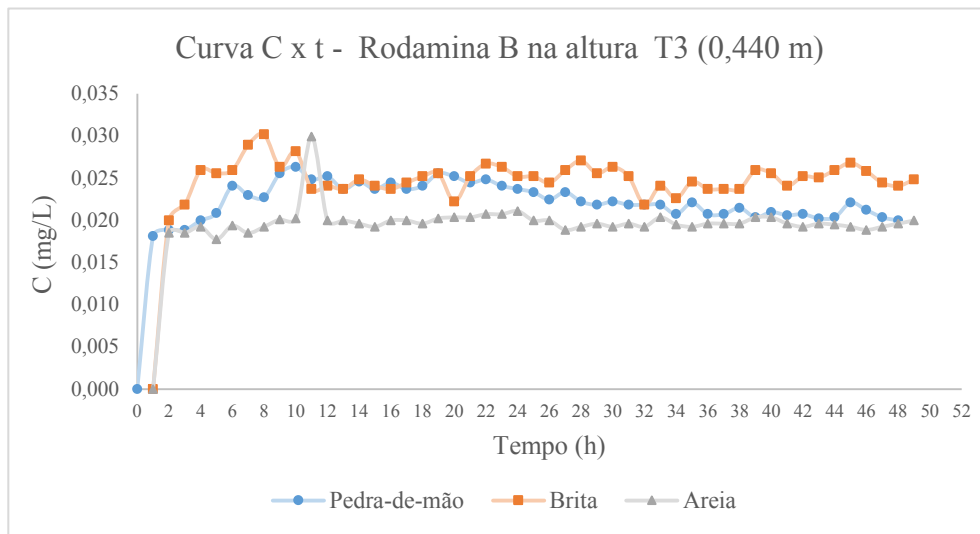


Figura 15 - Comparação das curvas respostas dos traçadores nos meios filtrantes nas alturas T3 e T4.



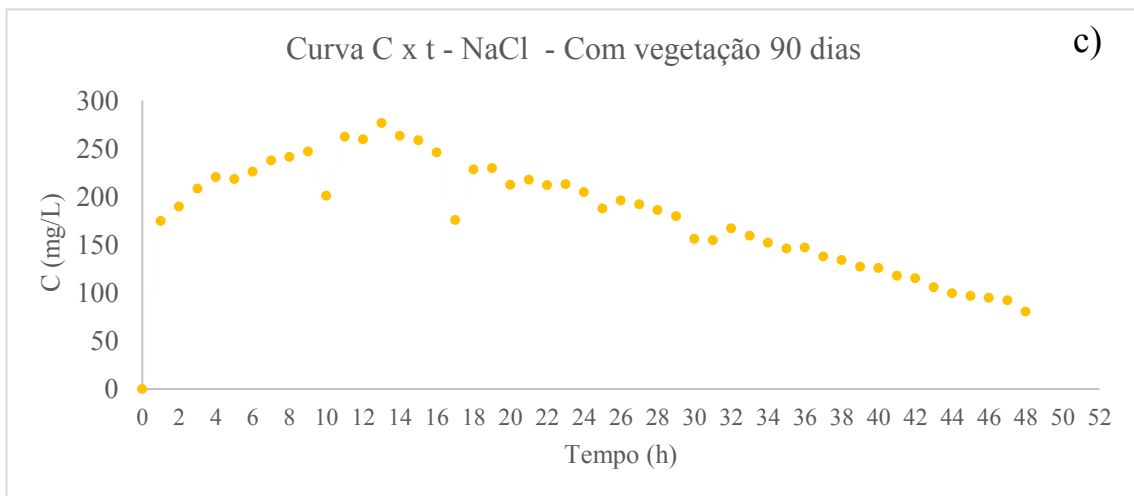
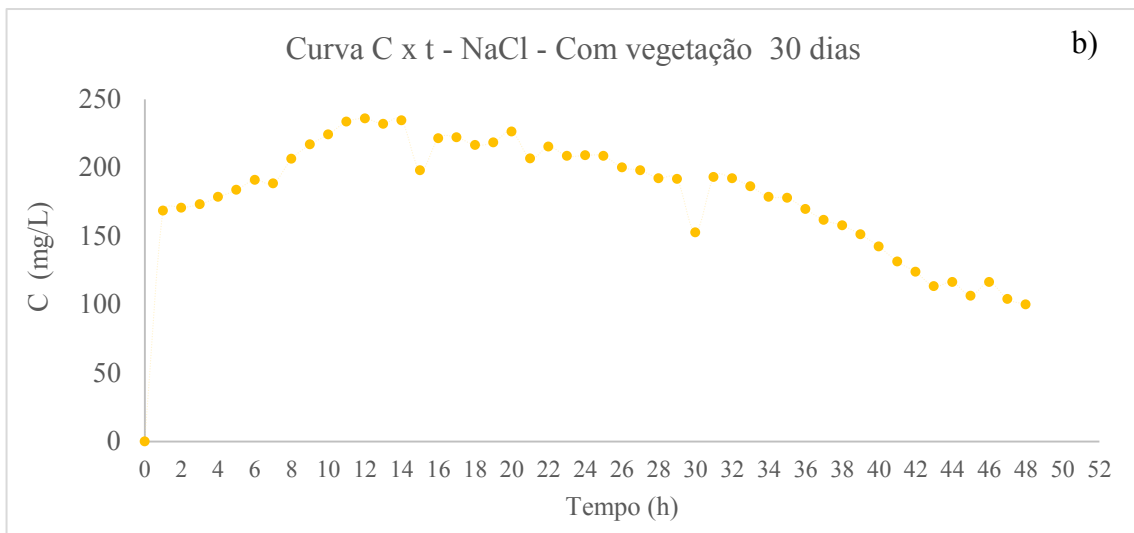
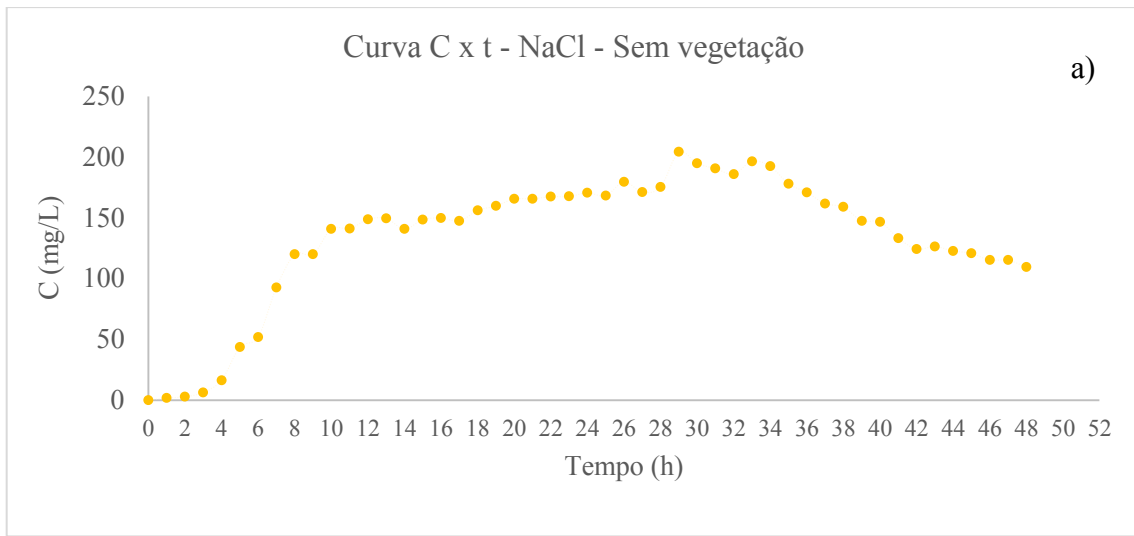
5.2 Etapa 2

Os ensaios hidrodinâmicos referentes à planta piloto montada com as camadas filtrantes (pedra de mão, brita, areia e solo) estão apresentados na Figura 16. As dimensões de cada meio filtrante foram: 0,18 m para pedra de mão, 0,12 m para brita, 0,12 m para areia e 0,14 m para o solo. O fato de a rodamina B ter apresentado grande estagnação, ocasionando baixa recuperação e interferindo nos resultados do balanço de massa, foi preponderante na escolha do NaCl como traçador da Etapa 2 da pesquisa.

Durante o tempo de monitoramento do sistema montado sem vegetação, não ocorreu o efeito de cauda (Gráfico (a) da Figura 16). Assim como nos ensaios com os meios filtrantes isolados, o TDH médio foi maior que o teórico. Após esse ensaio, foram plantadas seis mudas de taioba (*Xanthosoma sagittifolium*) no TEvap, com as distâncias de 25 x 50 cm entre uma e outra.

A curva resposta desse ensaio é apresentada no gráfico (c) da Figura 16. Neste ensaio, o TDH médio foi de 21 horas, apresentando redução de uma hora em relação ao ensaio realizado com vegetação com 30 dias. Ainda assim, mesmo com a redução do TDH médio, o comportamento da curva foi similar.

Figura 16 - Curva resposta do sistema montado com e sem vegetação, utilizando NaCl como traçador.



Na Tabela 4 são apresentadas as variáveis temporais, tempo de detenção teórico (TDH teórico) e médio (TDH médio), variância e tempo em que 10% e 90% do traçador foram encontrados nos ensaios hidrodinâmicos com o sistema TEvap montado. Nota-se a redução do TDH médio após inserção da vegetação, fato que pode estar associado à formação de caminhos preferenciais. Assim como nos ensaios com meios filtrantes, o TDH médio foi maior que o TDH teórico. Nardi, Zaiat e Foresti (1999) e Borges *et al.* (2009) atribuem essa ocorrência às anomalias no sistema, por exemplo, aprisionamento do traçador em zonas mortas.

Tabela 4 - Variáveis temporais obtidas nos ensaios com o sistema montado.

Traçador	Sistema	TDH teórico (h)	TDH médio (h)	σ^2 (min)	T ₁₀ (h)	T ₉₀ (h)
	Mont. s/ veg	13,73	27,02	133	10,42	42,42
NaCl	Mont. c/ veg. 30 d	13,73	22,45	165	5,00	40,28
	Mont. c/ veg. 90 d	13,73	21,07	162	4,38	39,40

Pdm: pedra de mão; σ : variância; T1 = 0,195 m; T2 = 0,317 m; T3 = 0,440 m; T4 = 0,580 m.

Segundo Knowles *et al.* (2011), a presença de raízes promove resistência ao escoamento no meio, de forma que a água (ou esgoto) escoar por caminhos em que não haja influência da vegetação, o que pode ter influenciado na redução do TDH médio. Blazejewski e Murat-Blazejewska (1970) relatam que os espaços vazios podem ser ocupados na medida em que os rizomas e as raízes crescem. Isso pode restringir a passagem por determinadas áreas do sistema.

Na Figura 17, apresentam-se as concentrações de NaCl em distintos pontos do piloto, para monitoramento das concentrações ao longo dos ensaios realizados com e sem vegetação. No horário em que se iniciaram os ensaios, a concentração no TEvap era igual. Após o traçador ser injetado no sistema, observou-se que os dois ensaios se comportaram de formas diferentes; no ensaio sem vegetação, após quatro horas, a concentração no fundo do sistema já estava acima de 370 mg/L, o que não ocorreu no sistema com vegetação, indicando que neste ensaio o traçador demorou mais para se dissipar no sistema¹.

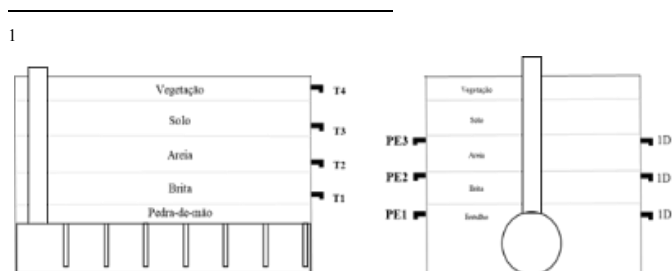
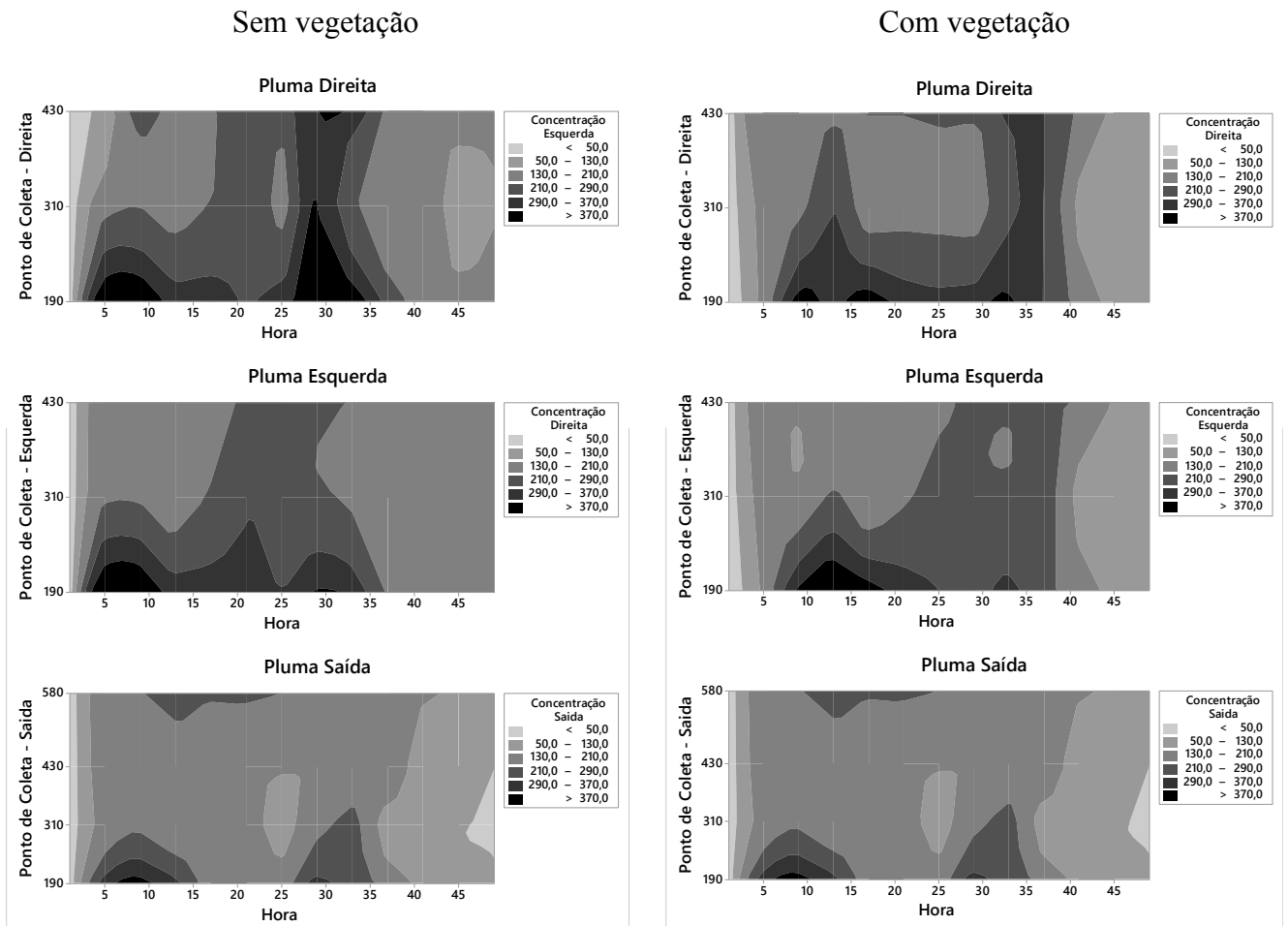


FIGURA 17 - Pluma do traçador no sistema montado com todas as camadas filtrantes, com e sem vegetação.



T1 = 0,190 m; T2 = 0,310 m; T3 = 0,430 m; T4 = 0,580 m; PD1 = 0,190m; PD2 = 0,310 m; PD3 = 0,125; PE1 = 0,190 m; PE2 = 0, 0,310 m; PE3 = 0,430; Conconcentração = mg/L.

Na Figura 17, observa-se ainda que o sistema sem vegetação não apresenta pontos com alta concentração. Analisando os pontos de coleta T1, PD1 e PE2, contata-se que o traçador tem seu maior tempo de concentração nos pontos de coleta instalados à direita e à esquerda do tanque, próximos do tubo de entrada. Percebe-se ainda que ao se comparar os pontos de coleta T1, T2, T3 e T4 (localizados próximos à saída do TEvap) aos PE1, PE2, PE3, PD1, PD2 e PD3 (Figura 11), as concentrações no final do período de experimento são maiores na parte próxima à entrada, em comparação à parte de saída do sistema.

Ao comparar os pontos de coleta do lado direito com o esquerdo, constata-se que as maiores concentrações ficam do lado direito. Isso pode ser relacionado à montagem do

piloto, que direcionava uma parte maior do traçador para o lado direito. Esse fato pode estar associado à perda de carga do sistema.

5.3 Comportamento hidrodinâmico

5.3.1 Parâmetros Hidrodinâmicos

Na Tabela 5, apresentam-se os parâmetros hidrodinâmicos Índice de Dispersão de Morril (IDM), Índice do Tempo de Retenção Médio (ITRM), eficiência hidráulica (λ) e porcentagem de traçador recuperado, encontrados nos ensaios com cada meio filtrante (pedra de mão, brita e areia) e com o TEvap montado com os respectivos meios filtrantes (com e sem vegetação).

O Índice de Dispersão de Morril (IDM) é a razão entre a passagem de 90% e 10% (T90%/T10%) da massa de traçador. O valor do IDM pode ser igual a 1, para fluxo pistonado ideal, e igual a 22, para mistura completa (METCALF; EDDY, 2015). A Agência Americana de Proteção Ambiental (U.S. EPA, 1986) recomenda valores de IDM menores que 2,0 para fluxo pistonado ideal.

Os menores valores de IDM foram encontrados nos ensaios utilizando NaCl, para os meios filtrantes pedra de mão, nas alturas T2 (0,317 m), T3 (0,440 m) e T4(0,580 m), 4,28, 4,15 e 4,15, respectivamente, para brita (4,76), na altura T4 (0,580 m), para areia (4,78), na altura T4, e para o ensaio com o TEvap montado sem vegetação (4,06).

De maneira geral, os valores do IDM ficaram mais próximos do valor de fluxo pistonado que do relacionado à mistura completa, exceto na altura T1 (0,195 m), utilizando areia como meio filtrante, cujo valor foi de 27,549, indicando mistura completa. Os valores encontrados nos ensaios mostram que em todas as alturas ocorreu dispersão. Ressalta-se que não foi encontrado na literatura estudos que determinem valores do IDM para faixas de baixa e alta dispersão. O único meio filtrante que apresenta variação do IDM, à medida que se aumenta a altura, é a areia, utilizando NaCl como traçador. Observando os resultados, percebe-se que no TEvap montado, a inserção de plantas promove o aumento da dispersão da massa do traçador no meio.

Para Thackston, Shields e Schoroeder (1987), a eficiência volumétrica (ev) ou ITRM indica se o reator foi totalmente utilizado (valor próximo de 1) ou parcialmente. Valores maiores que 1 indicam ineficiência na utilização do sistema. No presente trabalho, a maioria dos valores encontrados estão acima de 1, sendo exceção os resultados

encontrados nas alturas T1, T2 e T3 da pedra de mão. Esses valores apresentam a mesma tendência dos valores encontrados por Magalhães Filho *et al.* (2018), estudando uma câmara de evapotranspiração (TEvap). A apresentação de valores de ITRM acima de 1, segundo Costa (2016), justifica-se pelo aprisionamento do traçador em zonas mortas do sistema. Guimarães (2013) relata que valores acima de 1 são encontrados quando se tem um TDH médio acima do TDH teórico, o que ocorreu em todos os ensaios realizados neste estudo.

Para Cota (2011), valores de ITRM podem ser comprometidos pelo fenômeno de cauda longa e pelo atraso da saída do traçador. A autora relata que valores de eficiência volumétrica maiores que 1 confirmam a presença de zonas mortas no sistema e uma possível adsorção do traçador no meio suporte.

Avaliando a eficiência hidráulica (λ), Persson, Somes e Wong (1999) estabeleceram um critério que determina o valor de λ igual a 0,75, para sistemas com boa eficiência, λ entre 0,5 e 0,75, para sistemas com eficiência satisfatória e λ com valor menor que 0,5, para sistemas com baixa eficiência. Valores de eficiência hidráulica próximos a 1 indicam uma distribuição uniforme do fluxo no sistema e tendência ao fluxo pistonado (METCALF, EDDY, 2003; COTA, VON SPERLING, PENIDO, 2011).

Dos 26 valores de eficiência hidráulica encontrados, 14 se enquadram na classificação de baixa eficiência, 5 na de satisfatória e 8 na de boa eficiência. Cabe ressaltar que o TEvap montado com vegetação apresentou eficiência hidráulica menor que o sistema sem vegetação, indicando que a presença de vegetação pode influenciar na eficiência hidráulica.

Por outro lado, os resultados obtidos nos ensaios com vegetação apresentaram os maiores percentuais de recuperação de traçador. Os ensaios com rodamina B foram os que apresentaram os menores percentuais de recuperação, comprovando a hipótese de que o traçador fica estagnado no fundo do sistema.

As porcentagens de recuperação dos traçadores não ultrapassaram 80%. Em um contexto geral, os valores de recuperação entre rodamina B e NaCl foram bem distintos. Os valores de recuperação de NaCl variaram entre 24% e 77%, já os de rodamina B não passaram de 15%. Os resultados de recuperação de rodamina B reafirmam, mais uma vez, a hipótese da estagnação. Na literatura, observa-se que os resultados de recuperação de traçadores variaram bastante, Matos *et al.* (2015) recuperaram 72%, 66% e 49% do traçador (NaCl) em três tipos de sistemas alagados construídos de escoamento horizontal

subsuperficial (SAC-EHSS). Magalhães Filho *et al.* (2018) recuperaram acima de 90% de NaCl, em ensaios realizados em TEvap e SACs. O menor valor de recuperação encontrado por Costa (2016) foi de 90%, utilizando LiCl em sistemas alagados construídos (SACs).

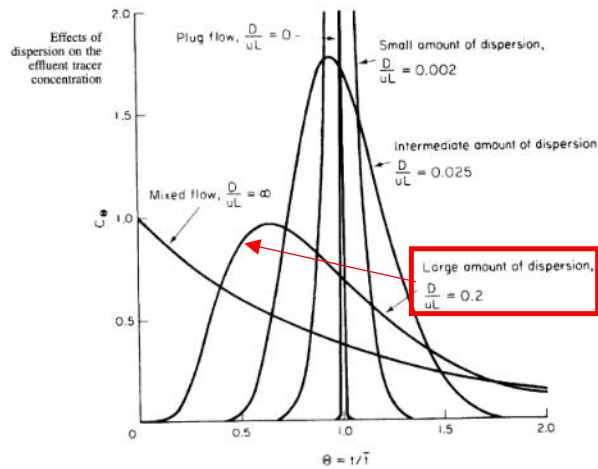
Tabela 5 - Parâmetros hidrodinâmicos obtidos nos ensaios.

Traçador	Altura	¹ IDM	² ITRM (ev)	³ Efic. Hidr.	⁴ % Recuperado
NaCl	Pdm - T1	9,61	0,58	0,29	66,96
	Pdm - T2	4,28	0,54	0,71	42,78
	Pdm - T3	4,15	0,66	0,79	42,43
	Pdm - T4	4,15	1,34	0,75	42,86
	Brita - T1	7,29	3,95	0,27	51,64
	Brita - T2	6,29	2,92	0,88	51,11
	Brita - T3	6,40	2,03	0,89	46,05
	Brita - T4	4,76	1,61	0,84	40,35
	Areia - T1	27,54	1,34	0,29	32,08
	Areia - T2	9,28	1,48	0,33	36,11
	Areia - T3	6,37	1,89	0,41	24,57
	Areia - T4	4,78	3,14	0,68	52,06
	Mont. s/ veg	4,06	3,01	1,07	54,27
	Mont. c/ veg. 30 d	8,05	2,17	0,53	67,94
	Mont. c/ veg. 90 d	8,98	1,64	0,61	77,62
	Rodamina B	Pdm - T1	11,99	4,53	0,18
Pdm - T2		7,85	3,01	0,49	12,36
Pdm - T3		7,86	2,23	0,41	12,29
Pdm - T4		7,97	1,89	0,62	12,33
Brita - T1		8,56	5,291	0,28	14,37
Brita - T2		8,35	3,32	0,44	14,10
Brita - T3		8,60	2,36	0,36	13,81
Brita - T4		7,74	1,84	1,08	13,45
Areia - T1		12,50	4,91	0,08	10,14
Areia - T2		8,64	3,36	0,37	9,88
Areia - T3		8,44	2,42	0,41	9,32
Areia - T4		8,79	1,84	1,57	9,53

Pdm: pedra de mão; T1 = 0,195 m; T2 = 0,317 m; T3 = 0,440 m; T4 = 0,580 m; ¹ IDM: Índice de Dispersão de Morril; ² ITRM: Índice do Tempo de Retenção Médio; ³ λ: eficiência hidráulica; ⁴ % Recuperado: porcentagem de traçador recuperado.

As curvas respostas encontradas no estudo com traçador apresentaram comportamento com grande dispersão, conforme a Figura 18.

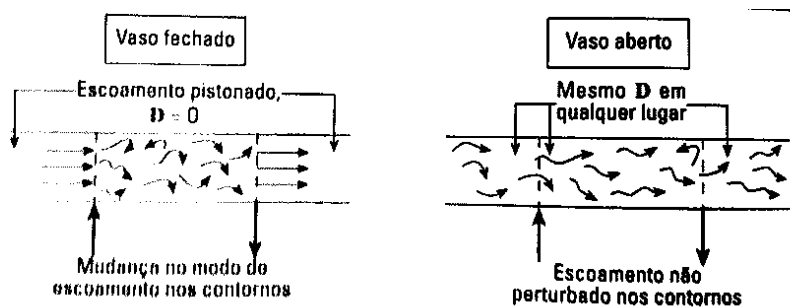
Figura 18 - Curvas típicas de resposta de traçador para reator de fluxo pistonado e mistura, conforme modelo de dispersão.



Fonte: Levenspiel (2000).

Para o cálculo do número de dispersão, é necessário definir a condição de contorno do reator. No caso de grande dispersão, a condição de contorno pode ser aberto, fechado e aberto-fechado. Segundo Metcalf e Eddy (2015), um sistema fechado assume que não há dispersão a montante ou a jusante, já no sistema aberto há dispersão a montante e a jusante, conforme Figura 19.

Figura 19 - Condições de contorno usadas com o modelo de dispersão.



Fonte: Levenspiel (2000).

Segundo Fogler (2009), nas condições de contorno fechado-fechado (entrada-saída), o fluido deve entrar e sair do reator apenas uma única vez, não existindo escoamento, difusão ou redemoinhos ascendentes na entrada ou na saída. Segundo Metcalf e Eddy (2015), o número de dispersão igual a zero, $d = 0$, indica que não há dispersão, ou seja é pistonado ideal. Se $d \leq 0,05$, a dispersão é baixa, d entre 0,05 e 0,25 indica uma dispersão moderada e valores acima de 0,25 indicam fluxo com alta dispersão. A elevada assimetria e a longa cauda observada nas curvas da figuras 12 e 16 indicam a elevada dispersão, segundo Levenspiel (2000).

Na Tabela 6, apresentam-se os números de dispersão calculados para as diferentes condições de contorno. Aquela que melhor se adequa às condições deste trabalho foi a aberto-fechado, pois, ao simular a descarga que entrava no sistema, foi promovida a turbulência da solução traçadora.

Tabela 6 - Valores calculados para o numero de dispersão.

Traçador	Altura	Grande	
		Fechado	Aberto-fechado
NaCl	Pdm - T1	0,36	0,18
	Pdm - T2	0,13	0,09
	Pdm - T3	0,12	0,09
	Pdm - T4	0,12	0,09
	Brita - T1	0,20	0,13
	Brita - T2	0,16	0,11
	Brita - T3	0,17	0,12
	Brita - T4	0,13	0,10
	Areia - T1	-	0,41
	Areia - T2	-	0,32
	Areia - T3	0,51	0,21
	Areia - T4	0,13	0,10
	Mont. s/ veg	0,15	0,08
	Mont. c/ veg. 30 d	0,23	0,13
	Mont. c/ veg. 90 d	0,30	0,14
	Rodamina B	Pdm - T1	0,27
Pdm - T2		0,19	0,13
Pdm - T3		0,19	0,13
Pdm - T4		0,19	0,13
Brita - T1		0,20	0,13
Brita - T2		0,19	0,13
Brita - T3		0,20	0,13
Brita - T4		0,18	0,12
Areia - T1		0,25	0,15
Areia - T2		0,20	0,13
Areia - T3		0,19	0,13
Areia - T4		0,19	0,13

Pdm: pedra de mão; T1 = 0,195 m; T2 = 0,317 m; T3 = 0,440 m; T4 = 0,580 m.

Os valores de d encontrados, em sua maioria, apresentam dispersão moderada, tanto para vaso fechado quanto aberto-fechado. As alturas das camadas que apresentaram valores de dispersão alta foram T1 (0,195 m) e T2 (0,317 m), com o meio filtrante areia, e T1, na pedra de mão, considerando a equação para vaso fechado.

Os valores de dispersão para vaso fechado foram obtidos através do método iterativo, sendo estimado um valor de dispersão para se obter o valor da variação

conhecido. Não foi possível calcular os valores das alturas T1 e T2 da areia para vaso fechado, por meio do método iterativo. Não foram encontrados trabalhos que avaliassem a dispersão em tanques de evapotranspiração.

5.3.2 Anomalias no sistema

A Tabela 7 apresenta os valores de volume de vazios. A menor porcentagem de volume de vazios foi na altura T1.

Tabela 7 - Resultados das anomalias no sistema obtidas pelos traçadores.

Traçador	Altura	Zonas Mortas	ICC
NaCl	Pdm - T1	1,78	0,05
	Pdm - T2	2,18	0,04
	Pdm - T3	1,82	0,04
	Pdm - T4	1,41	0,04
	Brita - T1	2,38	0,04
	Brita - T2	2,15	0,04
	Brita - T3	1,71	0,04
	Brita - T4	1,43	0,04
	Areia - T1	0,23	0,14
	Areia - T2	0,08	0,11
	Areia - T3	0,06	0,08
	Areia - T4	1,12	0,04
	Mont. s/ veg	1,78	0,03
	Mont. c/ veg. 30 d	1,14	0,04
	Mont. c/ veg. 90 d	0,95	0,04
	Rodamina B	Pdm - T1	2,51
Pdm - T2		2,41	0,04
Pdm - T3		2,04	0,04
Pdm - T4		1,62	0,04
Brita - T1		2,76	0,04
Brita - T2		2,42	0,04
Brita - T3		2,01	0,04
Brita - T4		1,63	0,04
Areia - T1		2,48	0,04
Areia - T2		2,20	0,04
Areia - T3		1,77	0,04
Areia - T4		1,31	0,04

Pdm: pedra de mão; T1 = 0,195 m; T2 = 0,317 m; T3 = 0,440 m; T4 = 0,580 m; ICC: índice de curto-circuito.

Ao analisar o conjunto, depreende-se que os volumes de vazios reduzem com o aumento das alturas. A presença de plantas reduziu o volume de vazios no TEvap, sendo

que, com tempo de adaptação, esses volumes foram reduzindo. Os maiores valores de volumes de vazios foram encontrados nos ensaios com rodamina B. Tem sido relatado que a vegetação aumenta os efeitos da zona morta (ANDRADOTTIR; NEPF, 2000). O lento decaimento da condutividade ao longo do tempo, apresentado na Figura 12, pode ter ocorrido em virtude de fenômeno de difusão em zonas mortas ao longo do sistema.

Os valores de Índice de Curto-Circuito, ICC, estão bem similares. Cota, Von Sperling e Penido (2011), estudando a hidrodinâmica em SACs, por meio da utilização do Tifton-85 (*Cynodon dactylon*), encontraram valores menores de ICC no sistema controle do que no plantado, diferente do que aconteceu neste estudo, uma vez que os valores de ICC aumentaram com a presença de plantas.

Magalhães Filho *et al.* (2018) encontraram valores de ICC de 0,60 e 0,31 para sistema TEvap, sem e com vegetação, respectivamente. Esses valores ficaram distantes dos encontrados no sistema montado com e sem vegetação nesta pesquisa (Tabela 7). Segundo os autores, valores de ICC próximos de 1 não garantem boas condições de mistura do reator, e a vegetação pode garantir valores baixos de ICC. No presente estudo, o sistema com vegetação apresentou valores de ICC maior que o sem vegetação.

Matos *et al.* (2015), estudando sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial (SAC-EHSS) encontraram valores de ICC de 0,19 (SAC plantado em estágio de florescimento), 0,23 (SAC controle) e 0,17 (SAC plantado em estágio de crescimento). Assim, como na pesquisa conduzida por Magalhães Filho *et al.* (2018), a presença de vegetação reduziu os valores do ICC.

5.4 Avaliação dos critérios para dimensionamento

O tanque de evapotranspiração consiste em um sistema de tratamento de esgoto doméstico vegetado que busca a ausência de efluente. No seu interior, ocorre a decomposição anaeróbia e aeróbia do material orgânico, mineralização dos nutrientes e absorção destes e de água pelas raízes das plantas. Portanto, obter o maior tempo de detenção hidráulico é necessário, uma vez que isso permitirá à vegetação maior tempo para transpirar a água para o ambiente. Todavia, a obtenção de um maior TDH não deve se dar às custas de uma grande quantidade de material filtrante.

Com base nos ensaios hidrodinâmicos, ao se comparar as diferentes alturas de camada do mesmo meio filtrante, torna-se possível analisar o aumento no TDH à medida

que se aumenta a altura do meio filtrante. Com os resultados apresentados na Tabela 3, os valores de TDH com rodamina B apresentaram-se similares. No entanto, devido à baixa recuperação, os parâmetros hidrodinâmicos e anomalias podem não ser confiáveis.

Pelos resultados desta pesquisa, a melhor altura para a camada de pedra de mão é a T2 (0,317m), analisando com base no traçador NaCl, pois nesta altura obteve-se um TDH de 22,42 horas e as alturas T3 (0,440 m) e T4 (0,580 m) apresentaram TDH próximo do encontrado em T2.

Para brita, utilizando NaCl, a melhor altura encontrada foi T1 (0,195 m). Isso se dá pois o tempo de detenção encontrado nesta altura (22,68 horas) é muito próximo do resultado obtido para as demais alturas, não justificando um gasto desnecessário com material para elaboração de uma camada mais alta.

Nos ensaios com areia, utilizando NaCl, a altura que apresentou maior TDH foi a T4 (23,44 horas). No entanto, essa altura é a que demanda maior quantidade de material filtrante; visto que sua função no sistema é promover a retenção de sólidos, recomenda-se a altura T1, que apresenta um tempo de detenção adequado para este sistema e demanda menos recursos.

A extrapolação dos resultados para uma escala real é possível, desde que seja respeitada a relação comprimento/largura (L/B).

Com base nos ensaios hidrodinâmicos, foi possível compreender melhor o funcionamento do TEvap. Na literatura, não foram encontrados estudos que se referissem aos espaçamentos entre os pneus ou furos em sistemas de alvenaria na câmara anaeróbia. Ao longo do sistema, na câmara de digestão, sugere-se que os furos e espaçamentos entre esses devem possuir valores diferentes, para que a distribuição do efluente ocorra de forma uniforme. O fundo do sistema deve ter uma inclinação mínima (entre 0,5 a 1%), de modo a permitir que o esgoto (água fecal) escoe por gravidade pela câmara anaeróbia.

A porosidade das camadas filtrantes constitui um fator muito importante na construção do sistema. A pedra de mão serve como meio suporte para formação do biofilme, portanto sua camada deve ter uma altura maior, pois o biofilme aderido no meio suporte estabiliza a matéria orgânica, pela ação de microrganismos. Entre os meios filtrantes pedra de mão/brita e brita/areia devem ser colocadas mantas porosas, que impedem a mistura entre as camadas. A última camada, de solo, deve ser dimensionada com base na vegetação que será utilizada. Deve-se considerar um fator de segurança no dimensionamento do tanque de evapotranspiração, a fim de suprir a demanda em caso de aumento do uso do vaso sanitário.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, foi possível avaliar o comportamento hidráulico do sistema Tanque de Evapotranspiração – TEvap, por meio do uso de traçadores:

- Os traçadores são hábeis na identificação de parâmetros hidrodinâmicos;
- Quanto aos traçadores: apesar dos valores de recuperação da rodamina B e do cloreto de sódio, foi possível obter os parâmetros hidrodinâmicos. O NaCl apresentou resultados mais confiáveis que a rodamina B, devido à estagnação desse traçador no interior do sistema;
- Quanto ao regime hidráulico: as camadas de meios filtrantes apresentaram o fluxo disperso;
- A eficiência volumétrica, que indica se o sistema está sendo utilizado total ou parcialmente, apresentou valores maiores que 1, concluindo que há ineficiência quanto à utilização do sistema;
- Os resultados de eficiência hidráulica (λ) obtidos neste estudo foram: 14 com baixa eficiência, 5 satisfatórios e 8 apresentaram boa eficiência;
- A presença de vegetação, neste estudo, teve influência sobre os valores de eficiência volumétrica, reduzindo o valor desse parâmetro;
- A vegetação contribuiu para a redução do volume de zonas mortas, mas também reduziu da eficiência volumétrica e hidráulica.
- A presença da vegetação contribuiu para o aumento do Índice de Curto-Circuito.

7 RECOMENDAÇÕES

Para estudos futuros, recomenda-se, para auxiliar na melhor compreensão desse sistema:

- Estudar as taxas de evapotranspiração de vegetações geralmente utilizadas nesse sistema;
- Estudar a eficiência de remoção de matéria orgânica e nutrientes do sistema piloto;
- Avaliar a geração de lodo no sistema piloto do TEvap, a fim de estimar geração de lodo e intervalos de limpeza e de vida útil.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9.648**: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR NM 53:2002**. Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, out. 2002.

_____. **NBR NM 30**. Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, jun. 2001.

_____. **NBR NM 248**. Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, out. 2006.

_____. **NBR NM 45:2006**. Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. São Paulo: ABNT, abr. 2006.

_____. **NBR 13.969**: Tanques sépticos - unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT. 1997.

_____. **NBR 7.229**: Projeto, construção e operação de sistemas de tanque séptico. Rio de Janeiro, 1993. 15 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas**/Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017.

ANDRADOTTIR, H. O; NEPF, H. M. Thermal mediation by littoral wetlands and impacts on lake intrusion depth. **Water Resources Research**, v.36, n. 3, p. 725-735. 2000.

BAETTKER, E. C. **Avaliação do desempenho de filtros anaeróbios preenchidos com diferentes meios suportes no tratamento de água residuária sintética**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

BLAZEJEWSKI, R.; MURAT-BLAZEJEWSKA, S. Soil clogging phenomena in constructed wetlands with subsurface flow. **Water Science and Technology**, v.35, n.5, p.183–188, 1997.

BORGES, A. C.; MATOS, A. T.; CALIJURI, M. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; ROLDÃO, J. S. F. Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de sistemas tropicais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.2, p.301-310, 2009.

BRACHO, N.; BRISSAUD, F.; VASEL, J. L. Hydrodynamic of ponds Part II: Practice. *In*: PALESTRA DO 8º IWA CONFERENCE ON WSP. **Anais [...]** Belo Horizonte: 26 a 30 de abril de 2009.

BRITO, B. N.; FASSONI, A. C.; MACHADO, D. F.; REZENDE, A. A. P. Nova abordagem de sistema de esgotamento sanitário em comunidades isoladas e tradicionais contemplando a segregação das águas servidas. *In*: Camera, F; Ribeiro, J. A. M. (Org.). **Prêmio Odebrecht para o desenvolvimento sustentável: livro comemorativo 2012**: compilação dos melhores projetos. 1ed. Rio de Janeiro: Construtora Noberto Odebrecht, 2012, v., p. 68-87.

BOWMER, K. H. Nutrient removal from effluents by an artificial wetland: Influence of rhizosphere aeration and preferential flow studied using bromide and dye tracers. **Water Research**, v. 21, n. 5, p. 591-599, 1987.

CHAZARENC, F.; MERLIN, G.; GONTHIER, Y. Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v 21, p. 165–173. 2003.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, p. 379, 2016.

COTA, R. S.; VON SPERLING, M.; PENIDO, R. C. S. Tracer studies and hydraulic behavior of planted and unplanted vertical-flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**. v.64, n. 5, p. 1056-1063. 2011.

COSTA, C.C.; GUILHOTO, J.M. Saneamento rural no Brasil: impacto da fossa séptica biodigestora. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.1, n.1, 2015.

COSTA, R. A. **Fatores associados aos parâmetros ajustados na equação de cinética de primeira ordem modificada utilizada em sistemas alagados construídos**. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.

DRUMOND, M. M. **A técnica de traçadores e o seu potencial para ampliar o conhecimento hidrológico sobre as bacias brasileiras: um estudo aplicado à bacia representativa de Juatuba – MG**. 2004. 304f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos** / Lafayette Franco Sobral ... [et al.] – Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 13 p. (Documentos) Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1953; 206).

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Editora Planta. 403p, 2006.

FERREIRA-SILVA, S. L.; VOIGT, E. L.; VIÉGAS, R. A.; PAIVA, J. D.; SILVEIRA, J. D. Influência de porta-enxertos na resistência de mudas de cajueiro ao estresse salino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 4, p. 361-367. 2009.

FERRI, M.G. (coord.). **Fisiologia vegetal**. 2.ed.rev.atual. São Paulo: EPU, 1986. v.2, 401p.

FIORI, S.; FERNANDES, V. M. C.; PIZZO, H. Avaliação qualitativa e quantitativa do reúso de águas cinzas em edificações. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 19-30. 2006.

FOGLER, H. S. **Elementos de engenharia das reações químicas**. Editora LTC, 4ª ed. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

GALBIATI, A. F. **Tratamento domiciliar de águas negras através de tanque de evapotranspiração**. 2009. 38 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2009.

GONÇALVES, R. F. (Coord.). **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, p. 352, 2009.

GONÇALVES, R. F. (Coord.). **Uso Racional da Água em Edificações**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, p. 352, 2006.

GRISMER, M. E.; TAUSENDSCHOEN, M.; SHEPHERD, H. L. Hydraulic characteristics of a subsurface flow constructed wetland for winery effluent treatment. **Water Environment Research**, v. 73, n. 4, p. 466-477, 2001.

GUIMARÃES, T. M. V. D. A. **Comportamento de filtro plantado horizontal (wetlands construídos) no tratamento de esgoto unifamiliar**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental).- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 89p. 2013.

HEADLEY, T. R.; KADLEC, R. H. Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide. **Ecohydrology e hydrobiology**, v. 7, n. 3-4, p. 269-282, 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br>. Acesso em 23 setembro de 2017.

_____. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios. Banco de Dados Agregados (PNAD)**. 2011.

_____. **Estimativas da população em 2016 e 2017**. Disponível em: www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?&t=downloads. Acesso em 23 setembro de 2017.

KADLEC, R.H.; WALLACE, S.D. **Treatment Wetlands**, 2nd ed. CRC Press: Boca Raton, FL, USA. p. 1046, 2008.

KÄSS, W. **Tracing technique in geohydrology**. Rotterdam: A.A.Balkema, p. 582, 1998.

KNOWLES, P.R.; DOTRO, G.; NIVALA, J.; GARCIA, J. Clogging in subsurface flow treatment wetlands: occurrence and contributing factors. **Ecological Engineering**, v. 37, p.99–112, 2011.

LEGAN, L. **Soluções sustentáveis. Uso da água na Permacultura**. Pirenópolis, GO: Mais Calango Editora. 64 p. 2008.

LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. 3rd edition. John Wiley, 688 pp. 2000.

LO MONACO, P. A. V. MATOS, A. T.; JÚNIOR, V. E.; RIBEIRO, I. C. A.; TEIXEIRA, D. L. Utilização do farelo de conchas de vôngole na adsorção de fósforo e como corretivo da acidez do solo. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 32, n. 5, p.866-874, out. 2012.

MACÊDO, J. A. B. **Águas e águas**. Belo Horizonte: CRQ-MG, 977p. 2004.

MACHADO, D. F.; ANDRADE, A. O.; MAIA, H. M.; REZENDE, A. A. P. Construção participativa de sistemas individuais de esgotamento sanitário em comunidades rurais. *In*: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE AGROECOLOGIA, 5. 2015, La Plata. **Memórias [...]** La Plata: Sociedade Científica Latinoamericana de Agroecologia. 2015. p 1-5.

MAGALHÃES FILHO, F. J. C. **Aspectos hidráulicos e hidrológicos de um sistema combinado de evapotranspiração e wetlands**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. 2013.

MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; SOBRINHO, T. A.; STEFFEN, J. L.; ARIAS, C. A.; PAULO, P. L. Hydraulic and hydrological aspects of an evapotranspiration-constructed wetland combined system for household greywater treatment. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, [s.l.], v. 53, n. 6, p.493-500, 24 jan. 2018.

MATOS, A. T.; ALMEIDA NETO, O. B.; MATOS, M. P. Saturação do complexo de troca de solos oxidicos com sódio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 18, n. 5, p. 501–506, 2014.

MATOS, M. P.; VON SPERLING, M.; MATOS, A. T.; PASSOS, R. G. Uso de traçador salino para avaliação da colmatção e das condições hidrodinâmicas em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 1137-1148, 2015.

METCALF, L.; EDDY, H. P.; **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**; McGraw-Hill, New York, 5nd edition, 2015.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, p. 239-250, 2002.

- NARDI, I. R.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. Influence of the tracer characteristics on hydrodynamic models of packed-bed bioreactors. **Bioprocess Engineering**, v. 21, n. 5, p. 469-476, 1999.
- NUVOLARI, A. **Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola**. 2ª edição. São Paulo, Ed. Edgar Blücher Ltda, p. 520, 2003.
- PAMPLONA, S.; VENTURI, M. **Esgoto à flor da terra**. Permacultura Brasil. Soluções ecológicas, v. 16, 2004.
- PASSOS, R. G.; DIAS, D. F. C.; MATOS, M. P.; VON SPERLING, M. Sodium chloride as a tracer for hydrodynamic characterization of a shallow maturation pond. **Water Practice And Technology**, [s.l.], v. 13, n. 1, p.30-38, mar. 2018. IWA Publishing.
- PAULO, P. L.; AZEVEDO, C.; BEGOSSO, L.; GALBIATI, A. F.; BONCZ, M. A. Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. **Ecological Engineering**, v. 50, p. 95-100, 2013.
- PAYNE, B. Status of isotope hydrology today. **Journal of Hydrology**, v.100, p. 207-237, 1988.
- PEÑA, M. R.; MARA, D.D.; AVELLA, G.P. Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates. **Water Research**, v.50, n.3, p. 445-452. 2006.
- PANIKKAR, A.; SHRESTHA, S.; HACKNEY, P.; RILEY, S. **A residential blackwater and a municipal solid waste treatment safety issues and municipal solid waste treatment system - safety issues and risk management**. ORBIT 2003 Conference, Murdoch University, Perth, Australia, 2003.
- PERSSON, J.; SOMES, N. L. G.; WONG, T. H. F. Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. **Water Science and Technology**, Oxford, v.40, n.3, p.291–300, 1999.
- PIRES, F. J. **Construção participativa de sistemas de tratamento de esgoto doméstico no Assentamento Rural Olga Benário**. 2012.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. **Guia de interpretação de análise de solo e foliar**. – Vitória, ES: Incaper, 2013. 104 p.
- RÊBELO, M. M. P. S. **Caracterização de águas cinzas e negras de origem residencial e análise da eficiência de reator anaeróbico com chicanas**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) UFAL - Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, 2011.
- REBOUÇAS, T. C.; BIANCHI, G.; BAZZARELLA, B. B.; WIGNER, P. L.; GONCALVES, R. F. Características físico-químicas e microbiológicas de diferentes

tipos de águas residuárias de origem residencial. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Belo Horizonte, 24, 2007. **Anais [...]** Minas Gerais: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.

RIBEIRO, J. P. L. **Modelação do Comportamento Hidráulico de Leitos de Macrófitas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa. 2007.

SANTIAGO, A. D. F. **Sistema condominial de coleta de esgoto e tratamento em decanto-digestor seguido de alagados construídos. Estudo de caso: município de Nova Redenção - BA**. 2008. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 122p., 2008.

SILVA, L. L.; DONNICI, C. L.; AYALA, J. D.; FREITAS, C. H.; MOREIRA, R. M.; PINTO, A. M. F. Traçadores: o uso de agentes químicos para estudos hidrológicos, ambientais, petroquímicos e biológicos. **Química Nova**, São Paulo, v.32, n.6, p.1576-1585, 2009.

SIQUEIRA, R. N. **Desenvolvimento e aperfeiçoamento de critérios de avaliação da eficiência hidráulica e do cálculo do coeficiente de mistura em unidade de tratamento de água e efluentes**. 1998. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1998.

THACKSTON, E. L.; SHIELDS, F. D.; SCHOROEDER, P. R. Residence time distributions of shallow basins. **Journal of Environmental Engineering**. vol. 113, n. 2, 219-223. 1987.

TOSCANI, D. C. **Avaliação e aplicação de simulações matemáticas para definição de regime hidráulico e constantes cinéticas de remoção de matéria orgânica em reatores de tratamento de esgoto sanitário**. 2010. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**, 1. ed. Harlow: Longman Scientific and Technical, 1995.

VIEIRA, I. **Bacia de evapotranspiração**. Criciúma: Setelombas, 2010. Disponível em: <http://www.setelombas.com.br>. Acesso em: 10 agosto de 2017.

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P. H. Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. **Boletim Wetlands Brasil**, Edição Especial, dezembro/2018. 65 p. ISSN 2359-0548. Disponível em: <http://gesad.ufsc.br/boletins/>. Acesso em: 10 dezembro de 2017.

VON SPERLING, M. **Hidrodinâmica de wetlands construídos**. 11-13 de jun de 2018. Notas de Aula.

U.S.EPA, -. E. P. A. **Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment**. Cincinnati: OH: US EP, 1988. 84 p.