

Renata Maria Marin

**AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE FÓSFORO ATRAVÉS DA
DISPOSIÇÃO DE EFLUENTE DOMÉSTICO TRATADO NO
SOLO**

Porto Alegre
Novembro 2021

RENATA MARIA MARIN

**AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE FÓSFORO ATRAVÉS DA
DISPOSIÇÃO DE EFLUENTE DOMÉSTICO TRATADO NO
SOLO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO APRESENTADO
AO INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE ENGENHEIRO HÍDRICO.

Orientadora: Maria Cristina de Almeida
Coorientador: Fernando Mainardi Fan

Porto Alegre
Novembro 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Marin, Renata Maria
AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE FÓSFORO ATRAVÉS DA
DISPOSIÇÃO DE EFLUENTE DOMÉSTICO TRATADO NO SOLO /
Renata Maria Marin. -- 2021.
83 f.
Orientadora: Maria Cristina de Almeida.

Coorientador: Fernando Mainardi Fan.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica,
Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. remoção de fósforo. 2. ortofosfato. 3. efluente
sanitário. 4. aplicação no solo.. I. de Almeida, Maria
Cristina, orient. II. Mainardi Fan, Fernando,
coorient. III. Título.

Renata Maria Marin

AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE FÓSFORO ATRAVÉS DA DISPOSIÇÃO DE
EFLUENTE DOMÉSTICO TRATADO NO SOLO

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 26/11/2021 pela Comissão Avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dra. Maria Cristina de Almeida Silva - Orientadora

.....
Prof. Dr. José Carlos Barroso Júnior – Faculdade Dom Bosco

.....
Dr. Ian Rocha Almeida – PPGRHSA

Conceito:.....

Dedico este trabalho a minha avó, Vilma Maria Teixeira Marin, que sempre me apoiou e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação esteve ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Professora Maria Cristina de Almeida Silva, orientadora deste trabalho pela amizade, críticas construtivas, horas despendidas no aprendizado e na pesquisa.

Agradeço ao Professor Fernando Mainardi Fan, coorientador deste trabalho pelas ideias criativas, aprendizados e conselhos profissionais e acadêmicos.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Saneamento da UFRGS (LABSAN) e do Laboratório de Sedimentos da UFRGS por todo apoio na realização das atividades relacionadas a esta pesquisa.

É melhor fazer as coisas sistematicamente, uma vez que nós somos somente humanos, e a desordem é a nossa pior inimiga.

Hesíodo

RESUMO

A eutrofização de corpos hídricos em decorrência do excesso de nutrientes como fósforo é algo preocupante que exige tratamento específico, tendo em vista a deficiência de remoção de algumas estações de tratamento de efluentes (ETE), que não foram desenvolvidas para essa finalidade. Existem alguns tipos de solo que possuem grande potencial de adsorvidade com os íons fosfato presentes no efluente doméstico. Considerando essa adsorção e a capacidade microbiológica de remoção de fósforo foi desenvolvida esta pesquisa, que teve como objetivo avaliar a remoção de fósforo total e ortofosfato do efluente tratado e coletado na ETE São João - Navegantes, utilizando como filtro camadas de solo. Este solo foi analisado texturalmente, além disso foi realizada a análise de respiração basal do mesmo, ao final do experimento. Foram testadas três taxas de aplicação superficial do efluente tratado no solo (150 L/m³.dia, 200 L/m³.dia e 300 L/m³.dia). Os resultados demonstraram que houve aumento da atividade microbiana do solo nos filtros após a aplicação do efluente. Em relação a eficiência de remoção de fósforo e ortofosfato, as três taxas demonstraram bons resultados, considerando as últimas semanas de análise.

Palavras-chave: remoção de fósforo, ortofosfato, efluente sanitário, aplicação no solo.

ABSTRACT

Eutrophication of water bodies due to excess of nutrients such as phosphorus is something worrying that requires specific treatment, in view of the deficiency of removal of some Effluent Treatment Stations (ETS), which were not developed for that purpose. There are some types of soil that have great potential for adsorptivity with the phosphate ions present on domestic effluent. Considering this adsorption and the microbiological capacity to remove phosphorus, this research was developed, which had the aim of evaluating the removal of total phosphorus and orthophosphate from treated and collected effluent at ETS São João - Navegantes, using soil layers as filter. That soil was analyzed texturally, and, in addition, the analysis of its basal respiration was carried out, during the end of the experiment. Three surface application rates of the treated effluent were tested on the soil (150 L/m³.day, 200 L/m³.day and 300 L/m³.day). The results showed that there was an increase of soil microbial activity in filters after effluent application. Regarding phosphorus and orthophosphate removal efficiency, the three rates showed good results, considering the last weeks of analysis.

Keywords: phosphorus removal, orthophosphate, sanitary effluent, soil application.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma das Etapas de Trabalho	20
Figura 2 - Sistema Individual	25
Figura 3 - Sistema Coletivo	25
Figura 4 - Representação esquemática do princípio de funcionamento do sistema de lodo ativado	27
Figura 5 - Modalidades do Sistema de Lodo Ativados	28
Figura 6 - Filtros utilizados na pesquisa	41
Figura 7 - Localização da instalação do experimento	43
Figura 8 - Coleta de amostra de solo com auxílio de pá.....	45
Figura 9 - Amostras de solo nos recipientes.....	46
Figura 10 - Amostras de solo nos sacos plásticos prontas para enviar ao laboratório de sedimentos	46
Figura 11 – ETE São João Navegantes	48
Figura 12 – Coleta de Efluente	48
Figura 13 - Provetas utilizadas no Experimento.....	49
Figura 14 - Provetas preenchidas com brita	50
Figura 15 – Provetas preenchidas com as camadas de Solo.....	51
Figura 16 – Bomba utilizada no Experimento.....	52
Figura 17 – Procedimento de análise de fósforo: (a) Pesando o persulfato de potássio para adicionar nas amostras; (b) Chapa Elétrica com as amostras e (c) Amostras prontas para passar pelo espectrofotômetro	53
Figura 18 – Curva padrão de calibração do espectrofotômetro.....	54
Figura 19 – Procedimento de análise de ortofosfato: (a) Execução do procedimento de análise de ortofosfato; (b) Amostras de fósforo total e ortofosfato prontas para análise de cor no equipamento e (c) Espectrofotômetro utilizado nas análises de ortofosfato e fósforo total.....	54
Figura 20 – Frasco com amostra de solo do filtro e o outro frasco com NaOH.....	55
Figura 21 – Frascos com o solo proveniente dos filtros utilizados durante as 8 semanas de experimento	56
Figura 22 – Titulação com ácido clorídrico.....	57
Figura 23 – Remoção de Fósforo Total	61
Figura 24 – Remoção de Ortofosfato	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Etapas do tratamento de esgoto	25
Quadro 2 - Padrões de lançamento de efluentes.....	28
Quadro 3 - Valores de concentração estabelecidos pela CONSEMA 355/2017 para efluentes sanitários.....	29
Quadro 4 - Valores de concentração estabelecidos pela CONSEMA 355/2017 para efluentes sanitários.....	30
Quadro 5 - Padrão de qualidade do efluente para disposição no solo	30
Quadro 6 - Vantagens e Desvantagens de sistemas de disposição de efluente no solo.....	32
Quadro 7 - Tipos de disposição de efluente no solo.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características físicas dos esgotos domésticos	21
Tabela 2 - Características químicas (sólidos totais)	22
Tabela 3 - Características químicas (matéria orgânica)	22
Tabela 4 - Características químicas (nitrogênio)	23
Tabela 5 - Características químicas (fósforo, pH, alcalinidade, cloretos e óleos e graxas) ...	23
Tabela 6 – Características biológicas	24
Tabela 7 - Análise Granulométrica e Classificação do tipo de Solo	47
Tabela 8 - Dimensões dos Filtros	49
Tabela 9 - Valores pesquisados na bibliografia para a caracterização do efluente bruto	59
Tabela 10 – Valores estimados para caracterização do efluente tratado pelo processo de lodo ativado a partir das eficiências de remoção de poluentes (%) propostas por Von Sperling (2005).	60
Tabela 11 – Dados de Fósforo Total utilizados no cálculo de % de remoção	60
Tabela 12 - Eficiência de remoção Fósforo Total (%)	62
Tabela 13 - Dados de Ortofosfato utilizados no cálculo de % de remoção	62
Tabela 14 – Respiração Basal do Solo	64

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CC: Capacidade de Campo

CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

COT: Carbono Orgânico Total

DBO: Demanda Química de Oxigênio

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxigênio. Medida a 5 dias, 20° C

ETE: Estação de Tratamento de Esgotos

FEPAM: Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler

FUNASA: Fundação Nacional de Saúde

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas

LABSAN: Laboratório de Saneamento

NBR: Norma Brasileira

NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl

pH: potencial Hidrogeniônico

RBS: Respiração Basal do Solo

RS: Rio Grande do Sul

SABESP: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SNIS: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SS: Sólidos Suspensos

SST: Sólidos Suspensos Totais

TAS: Taxa de Aplicação Superficial

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

USEPA: Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

LISTA DE SÍMBOLOS

BaCl₂: Cloreto de Bário

CO₂: Dióxido de carbono

HCl: Ácido Clorídrico

M: molar

N: Nitrogênio

NaOH: Hidróxido de Sódio

P: Fósforo

PO₄: Ortofosfato

(PO₄)³⁻: Fosfato

Q: Vazão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. DIRETRIZES DA PESQUISA	18
2.1. QUESTÃO DA PESQUISA	18
2.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	18
2.2.1. Objetivo principal	18
2.2.2. Objetivos Secundários	18
2.3. DELIMITAÇÃO DO TEMA	18
2.4. LIMITAÇÃO DO TEMA	18
2.5. DELINEAMENTO	19
3. REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1. EFLUENTES DOMÉSTICOS	21
3.1.1. Características dos Efluentes Domésticos	21
3.1.2. Tipos de Sistemas de Esgotamento Sanitário	24
3.1.3. Tratamento de Efluentes Domésticos	25
3.1.4. Padrão de Qualidade e Legislação Ambiental	28
3.1.5. Remoção de Fósforo de Efluentes	31
3.1.6. Disposição de esgoto tratado no solo	31
3.1.7. Reuso de Efluentes na Agricultura	34
3.1.8. Taxa de Aplicação Superficial (TAS)	34
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	34
3.2.1. Características Físicas do Solo	34
3.2.1.1. Textura do Solo	35
3.2.1.2. Estrutura do Solo	35
3.2.1.3. Porosidade do Solo	35
3.2.1.4. Densidade do Solo	36
3.2.1.5. Fluxo de Água no Solo	36
3.2.2. Características Químicas do Solo	36
3.2.2.1. Nutrientes	36
3.2.2.2. Troca Iônica	37
3.2.3. Características Microbiológicas	37
3.2.3.1. Respiração basal	37
3.2.4. Taxa de Infiltração no Solo	38
3.2.5. Horizontes do Solo	38
3.2.6. Saturação do Solo	39
3.2.7. Percolação	39

3.2.8. Permeabilidade do Solo	40
3.3. ESTADO DA ARTE	40
4. METODOLOGIA	43
4.1. LOCALIZAÇÃO E INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO	43
4.1.1. Características do Local de Coleta do Solo	44
4.2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	44
4.2.1. Coleta da amostra de solo para a caracterização textural	44
4.2.2. Caracterização textural do solo amostrado	47
4.2.3. Coleta das amostras de efluente na ETE São João	47
4.2.4. Montagem do filtro com as camadas de solo	49
4.2.5. Análise do efluente bruto e tratado pelo filtro	53
4.2.5.1. Fósforo Total	53
4.2.5.2. Ortofosfato	54
4.2.6. Respiração basal do solo	55
4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	57
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DA ETE SÃO JOAO NAVEGANTES	59
5.2. REMOÇÃO DE FÓSFORO E ORTOFOSFATO	60
5.2.1. Fósforo Total	60
5.2.2. Ortofosfato	62
5.3. RESPIRAÇÃO BASAL DO SOLO	64
6. CONCLUSÕES	65
7. RECOMENDAÇÕES	66
REFERÊNCIAS	67
ANEXO 1- LAUDO DE GRANULOMETRIA	73

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com medidas sanitárias, devido a proliferação de doenças de veiculação hídrica existe há muito tempo. Com o crescimento da população ao longo do tempo, a água potável vem sendo um elemento cada vez mais escasso, pois além do consumo ter aumentado a poluição dos corpos hídricos também cresceu.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS), apenas 49,1% do esgoto gerado é tratado no Brasil e somente 78,5% do esgoto coletado recebe tratamento (SNIS, 2019). Estes dados apontam uma incipiência no tratamento de esgoto e o investimento nesse segmento de pesquisa é uma das soluções, pois propiciam tratamento de baixo custo, podem ser adaptadas facilmente e ainda ser empregada em maior escala.

Os efluentes líquidos são resíduos provenientes de atividades antrópicas. Tendo em vista o nocivo potencial poluidor deste rejeito ao meio ambiente e à sociedade, são necessários que sejam efetuados tratamentos eficazes para diminuição de sua carga poluidora. Desta forma, são alcançados os limites dos parâmetros de lançamento definidos pela legislação, para que assim possam ser dispostos em rios ou no solo, sem que cause danos a estes recursos naturais (BADO; PERCIO e LINDINO, 2012).

As estações de tratamento de efluentes mais atuais foram projetadas para remover primordialmente material orgânico biodegradável. Em relação ao fósforo, que é um dos elementos que compõem a carga poluidora proveniente dos esgotos sanitários, as estações de tratamento convencionais apresentam algumas limitações para remover o elemento, pois não são dimensionadas com tal propósito (MENDONÇA, 2012).

O despejo de efluentes parcialmente tratados em corpos hídricos pode causar eutrofização com risco de proliferação de diversos organismos, como bactérias, microalgas e macrófitas flutuantes, o que pode comprometer a qualidade da água e a vida no ambiente. A eutrofização dos mananciais devido aos nutrientes descartados no ambiente, especialmente em grandes centros urbanos como Porto Alegre, tem gerado problemas crescentes na qualidade da água, principalmente por alterações organolépticas causadas pela potencial presença de espécies de algas (cianobactérias) (BARROSO, 2020).

Detergentes, águas pluviais de cidades, rejeitos de minas, drenagem de dejetos (humanos e animais) e fertilizantes agrícolas, são alguns dos resíduos com alto teor de fósforo. Esse nutriente em excesso pode provocar diversos impactos negativos, com especial referência à qualidade das águas. Os nutrientes estimulam o crescimento de algas e plantas, que interferem com a utilização da água para beber ou recreação; estas entradas, geralmente irregulares, causam ondas de crescimento, seguidas por períodos de consumo excessivo que podem utilizar todo o oxigênio e exterminar os peixes. Quando estes resíduos aumentam a concentração de nutrientes (fosfatos, principalmente) de rios e lagos, podem causar eutrofização excessiva (KLEIN e ANTONINI, 2012).

A remoção de fósforo pode ocorrer via processos físico, químico ou biológico. Os processos físicos têm alto custo e nem sempre são eficientes. Já os processos biológicos podem sofrer variação na eficiência de remoção de fósforo. Nos processos químicos utilizam-se sais como Cálcio (Ca), Ferro (Fe) e Alumínio (Al), que são seguros e bem estabelecidos (CLARK et al., 1997).

Atualmente, o assunto de disposição de efluentes no solo, vem sendo alvo de discussão. Em julho de 2019 entrou em vigor a Portaria FEPAM nº 68/2019, que dispõe sobre os critérios para disposição final de efluentes líquidos sanitários e efluentes líquidos industriais em solo no Estado do Rio Grande do Sul.

Sistemas de tratamento usando o solo podem ser definidos como a aplicação controlada de esgoto na sua superfície, a fim de alcançar um determinado grau de depuração através de processos físicos, químicos e biológicos naturais inerentes à matriz solo, planta e água (FUNASA, 2006).

Diante deste cenário, a utilização do solo como polimento (pós-tratamento) para o esgoto é algo que deve ser estudado, observando como ocorre a remoção do fósforo variando a taxa de aplicação.

2. DIRETRIZES DA PESQUISA

Os seguintes itens apresentam as diretrizes que limitam o método de pesquisa proposto.

2.1. QUESTÃO DA PESQUISA

Como questão de pesquisa temos: As camadas do solo podem atuar como um filtro natural, na remoção de fósforo, servindo como pós-tratamento para o efluente doméstico?

2.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e são apresentados a seguir:

2.2.1. Objetivo principal

Este trabalho tem como objetivo avaliar a remoção de fósforo de águas residuárias tratadas, de origem doméstica, utilizando o solo como meio filtrante

2.2.2. Objetivos Secundários

Os objetivos secundários desse trabalho são:

- a) Analisar as características físicas e químicas do esgoto doméstico da ETE São João Navegantes, através de série histórica;
- b) Avaliar a remoção de fósforo total e ortofosfato de esgoto doméstico tratado, testando 3 taxas de aplicação distintas;
- c) Avaliar a respiração basal do solo ao término do experimento proposto.

2.3. DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho delimita-se na realização de análises de fósforo e ortofosfato do efluente doméstico através da aplicação em solo.

2.4. LIMITAÇÃO DO TEMA

A principal limitação deste trabalho é o uso de apenas efluente doméstico, não havendo utilização de outros tipos de esgotos. Além disso outra limitação foi que devido a alguns

problemas enfrentados no laboratório, como equipamentos estragados e/ou descalibrados por estarem muito tempo parados pelo período de quarentena pela COVID-19 foi necessário adaptar a proposta inicial de caracterização do efluente. Os tipos de solo, a temperatura, o clima e a realização em ambiente “controlado”.

2.5. DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir:

- a) Estudo sobre a caracterização de efluentes domésticos;
- b) Estudo das etapas de tratamento de esgoto doméstico em estação de tratamento: com ênfase ao processo de lodos ativados por aeração prolongada;
- c) Estudo referente à caracterização e comportamento do solo, sem a presença de percolado;
- d) Estudo dos parâmetros de qualidade do efluente para disposição no solo, exigidos pela legislação;
- e) Estudo de pesquisas relacionadas ao tema: análise de conteúdo e recomendações;
- f) Definição da metodologia de análise do efluente;
- g) Coleta e análise de informações;
- h) Conclusões e recomendações.

As cinco primeiras etapas consistem na revisão bibliográfica, em que o estudo de tópicos relevantes para elaboração do embasamento teórico foi realizado. Iniciou-se com o estudo sobre a caracterização do esgoto doméstico. Em seguida, estudaram-se os processos de tratamento em ETEs. Neste tópico, deu-se ênfase ao processo de lodos ativados por aeração prolongada, visto que a estação de onde foram coletadas as amostras de efluente do estudo apresenta este tipo de processo. A caracterização do solo e os parâmetros de qualidade do efluente, segundo a Portaria nº68/2019 da FEPAM foram itens que complementaram os demais tópicos. Concluindo a revisão bibliográfica, fez-se estudo de algumas pesquisas similares com análise de conteúdo e compilação de recomendações.

A Figura 1 apresenta um fluxograma de trabalho dividido em três principais etapas.

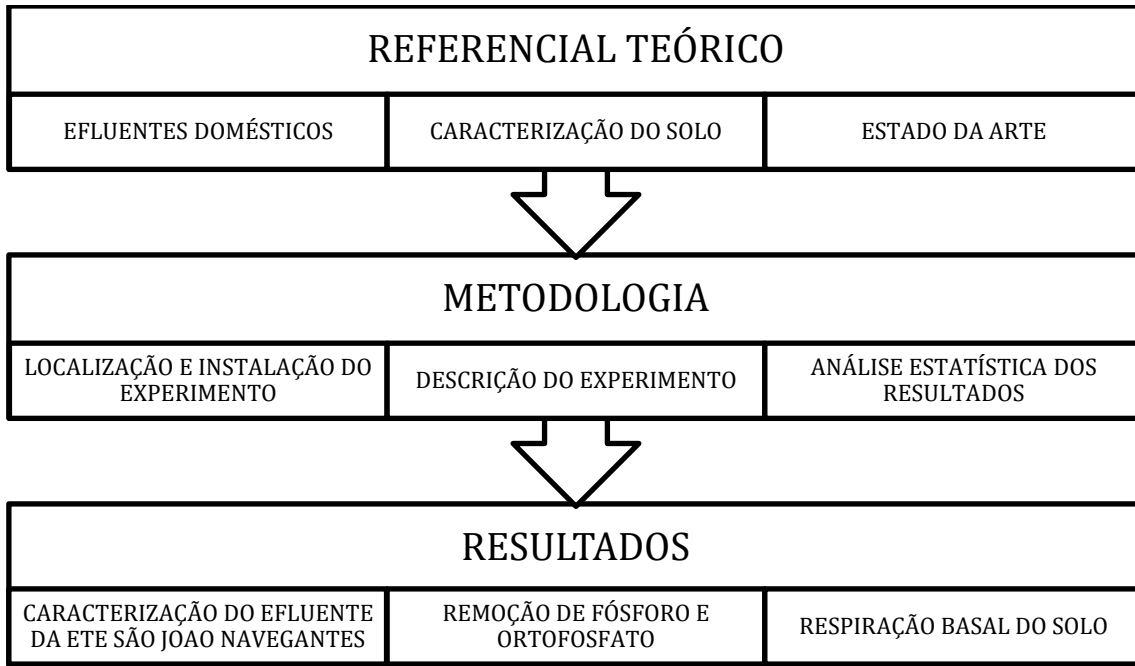


Figura 1- Fluxograma das Etapas de Trabalho

Fonte: Própria da autora (2021).

Após a definição da metodologia, foi realizada a coleta de dados. Com as informações levantadas, a análise do potencial de remoção de fósforo do esgoto, fazendo-se uso do solo como agente filtrador, foi realizada.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. EFLUENTES DOMÉSTICOS

Os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água. A fração restante inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microrganismos. A característica dos esgotos é função dos usos à qual a água foi submetida. Esses usos, e a forma com que são exercidos, variam com o clima, situação social e econômica, e hábitos da população (VON SPELING, 2005).

3.1.1. Características dos Efluentes Domésticos

Os esgotos domésticos provêm principalmente de residências, edifícios comerciais, instituições ou quaisquer edificações que contenham instalações de banheiros, lavanderias, cozinhas, ou qualquer dispositivo de utilização da água para fins domésticos. Compõem-se essencialmente de água de banho, urina, fezes, papel, restos de comida, sabão, detergentes, águas de lavagem (JORDÃO e PESSÔA, 2014).

As principais características físicas dos esgotos domésticos, são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Principais características físicas dos esgotos domésticos

Parâmetro	Descrição
Temperatura	Ligeiramente superior à da água de abastecimento
	Varição conforme as estações do ano (mais estável que a temperatura do ar)
	Influência na atividade microbiana
	Influência na solubilidade dos gases
	Influência na velocidade de reações químicas
	Influência na viscosidade do líquido
Cor	Esgoto fresco: ligeiramente cinza
	Esgoto séptico: cinza escuro ou preto
Odor	Esgoto fresco: odor oleoso, relativamente desagradável
	Esgoto séptico: odor fétido (desagradável), devido ao gás sulfídrico e a outros produtos da decomposição
	Despejos industriais: odores característicos
Turbidez	Causada por uma grande variedade de sólidos em suspensão
	Esgotos mais frescos ou mais concentrados: geralmente mais turbidez

Fonte: Adaptado de Qasim (1985).

A Tabela 2 apresenta as principais características químicas, referentes aos sólidos totais dos esgotos domésticos.

Tabela 2 - Características químicas (sólidos totais)

Parâmetro	Descrição
<i>SÓLIDOS TOTAIS</i>	<i>Orgânicos e inorgânicos; suspensos e dissolvidos; sedimentáveis.</i>
<u>Em suspensão</u>	Fração dos sólidos orgânicos e inorgânicos que são retidos em filtros de papel com aberturas de dimensões padronizadas (0,45 a 2,0 µm).
• Fixos	Componentes minerais, não incineráveis, inertes, dos sólidos em suspensão.
• Voláteis	Componentes orgânicos dos sólidos em suspensão
<u>Dissolvidos</u>	Fração dos sólidos orgânicos e inorgânicos que não são retidos nos filtros de papel descritos acima. No teste laboratorial, englobam também os sólidos coloidais.
• Fixos	Componentes minerais dos sólidos dissolvidos.
• Voláteis	Componentes orgânicos dos sólidos dissolvidos
<u>Sedimentáveis</u>	Fração dos sólidos orgânicos e inorgânicos que sedimenta em 1 hora no cone Imhoff. Indicação aproximada da sedimentação em um tanque de decantação.

Fonte: Adaptado de Arceivala (1981), Qasim (1985) e Metcalf & Eddy (1991).

A Tabela 3 apresenta as principais características químicas, referentes a matéria orgânica dos esgotos domésticos.

Tabela 3 - Característica químicas (matéria orgânica)

Parâmetro	Descrição
<i>MATÉRIA ORGÂNICA</i>	<i>Mistura heterogênea de diversos compostos orgânicos. Principais componentes: proteínas, carboidratos e lipídios.</i>
<i>Determinação indireta</i>	
• DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio. Medida a 5 dias, 20° C. Está associada à fração biodegradável dos componentes orgânicos carbonáceos. É uma medida do oxigênio consumido após 5 dias pelos microrganismos na oxidação bioquímica da matéria orgânica.
• DQO	Demanda Química de Oxigênio. Representa a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar quimicamente a matéria orgânica carbonácea. Utiliza fortes agentes oxidantes (dicromato de potássio) em condições ácidas.
• DBO última	Demanda Última de Oxigênio. Representa o consumo total de oxigênio, ao final de vários dias, requerido pelos microrganismos para a oxidação bioquímica da matéria orgânica
<i>Determinação direta</i>	
• COT	Carbono Orgânico Total. É uma medida direta da matéria orgânica carbonácea. É determinado através da conversão do carbono orgânico a gás carbônico.

Fonte: Adaptado de Arceivala (1981), Qasim (1985) e Metcalf & Eddy (1991).

A Tabela 4 apresenta as principais características químicas, referentes nitrogênio dos esgotos domésticos.

Tabela 4 - Características químicas (nitrogênio)

Parâmetro	Descrição
<i>NITROGÊNIO TOTAL</i>	<i>O nitrogênio total inclui o nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato. É um nutriente indispensável para o desenvolvimento dos microrganismos no tratamento biológico. O nitrogênio orgânico e a amônia compreendem o denominado Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)</i>
● Nitrogênio orgânico	● Nitrogênio na forma de proteínas, aminoácidos e uréia.
● Amônia	● Produzida como primeiro estágio da decomposição do nitrogênio orgânico.
● Nitrito	● Estágio intermediário da oxidação da amônia. Praticamente ausente no esgoto bruto.
● Nitrato	● Produto final da oxidação da amônia. Praticamente ausente no esgoto bruto.

Fonte: Adaptado de Arceivala (1981), Qasim (1985) e Metcalf & Eddy (1991).

A Tabela 5 apresenta as principais características químicas, referentes ao fósforo, pH, alcalinidade, cloretos e óleos e graxas dos esgotos domésticos.

Tabela 5 - Característica químicas (fósforo, pH, alcalinidade, cloretos e óleos e graxas)

Parâmetro	Descrição
FÓSFORO	O fósforo total existe na forma orgânica e inorgânica. É um nutriente indispensável no tratamento biológico
● Fósforo orgânico	● Combinado à matéria orgânica.
● Fósforo inorgânico	● Ortofosfato e polifosfatos
pH	Indicador das características ácidas ou básicas do esgoto. Uma solução é neutra em pH 7. Os processos de oxidação biológica normalmente tendem a reduzir o pH.
ALCALINIDADE	Indicador da capacidade tampão do meio (resistência às variações do pH). Devido à presença de bicarbonato, carbonato e íon hidroxila
CLORETOS	Provenientes da água de abastecimento e dos dejetos humanos.
ÓLEOS E GRAXAS	Fração da matéria orgânico solúvel em hexanos. Nos esgotos domésticos, as fontes são óleos e gorduras utilizados nas comidas.

Fonte: Adaptado de Arceivala (1981), Qasim (1985) e Metcalf & Eddy (1991).

A Tabela 6 apresenta as principais características biológicas, referentes a bactérias, fungos, protozoários, vírus e helmintos.

Tabela 6 – Características biológicas

Microrganismos	Descrição
Bactérias	<ul style="list-style-type: none"> • Organismos protistas unicelulares. • Apresentam-se em várias formas e tamanhos. • São os principais responsáveis pela estabilização da matéria orgânica.
Fungos	<ul style="list-style-type: none"> • Organismos aeróbios, multicelulares, não fotossintéticos, heterotróficos. • Também de grande importância na decomposição da MO. • Podem crescer em condição de baixo pH.
Protozoários	<ul style="list-style-type: none"> • Organismos unicelulares sem parede celular. • A maioria é aeróbia ou facultativa. • Alimentam-se de bactérias, algas e outros microrganismos. • São essenciais no tratamento biológico para a manutenção de um equilíbrio entre os diversos grupos. • Alguns são patogênicos.
Vírus	<ul style="list-style-type: none"> • Organismos parasitas, formados pela associação de material genético (DNA ou RNA) e uma carapaça proteica. • Causam doenças e podem ser de difícil remoção no tratamento da água ou esgoto.
Helmintos	<ul style="list-style-type: none"> • Animais superiores. • Ovos de helmintos presentes nos esgotos podem causar doenças.

Fonte: Silva (2012).

3.1.2. Tipos de Sistemas de Esgotamento Sanitário

Segundo Von Sperling (1995), há basicamente duas variantes dos sistemas de esgotamento sanitário:

- Sistema individual (solução no local, individual ou para poucas residências);
- Sistema coletivo (solução com afastamento dos esgotos da área servida).

Os sistemas individuais (Figura 2) pressupõem a solução no local, sendo, portanto, usualmente adotados para atendimentos unifamiliar, embora possam também atender a um certo número de residências próximas entre si. Consistem no lançamento de excretas em privadas higiênicas, solução unifamiliar ou dos esgotos em fossas gerados em uma ou poucas unidades habitacionais, usualmente envolvendo infiltração no solo.

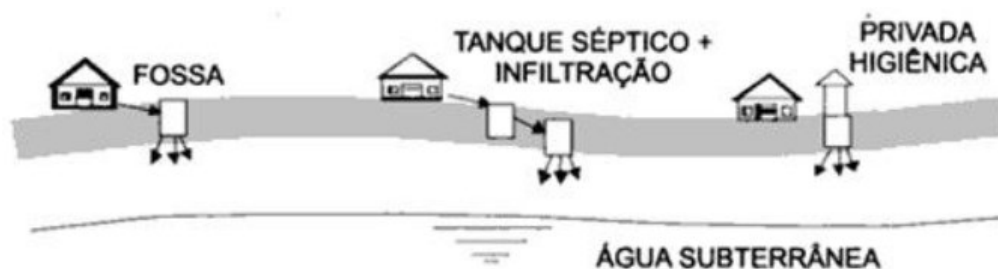


Figura 2 - Sistema Individual

Fonte: Von Sperling (2005).

Os sistemas coletivos (Figura 3) são indicados para locais com elevada densidade populacional, como no meio urbano. Esta solução consiste em canalizações que recebem o lançamento de esgotos, transportando-os ao seu destino final, de forma sanitariamente adequada.

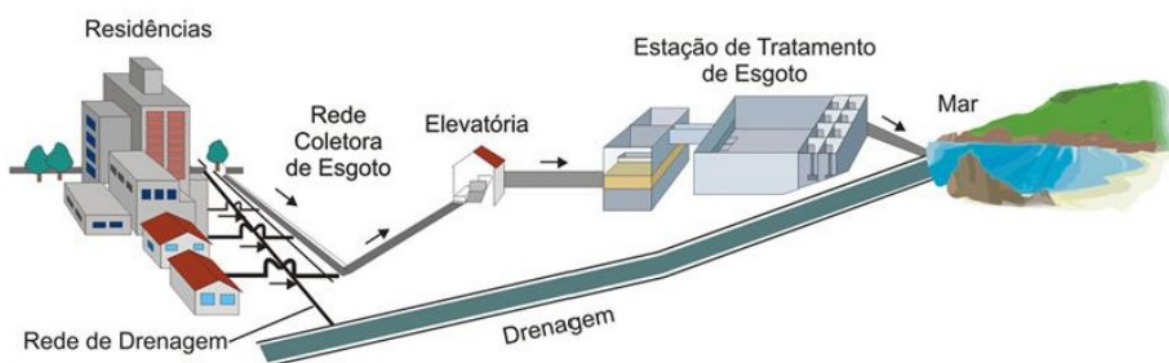


Figura 3 - Sistema Coletivo

Fonte: Brasil (2020).

3.1.3. Tratamento de Efluentes Domésticos

O tratamento de esgotos consiste na remoção de poluentes e o método a ser utilizado depende das características físicas, químicas e biológicas (SABESP, 2019). As etapas do tratamento de esgoto são descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Etapas do tratamento de esgoto

Nível de Tratamento	Descrição	Tipo de remoção
Preliminar	Remoção de constituintes dos esgotos como galhos, objetos flutuantes, areia e gordura que possam causar dificuldades operacionais ou de conservação nos processos ou operações unitárias de tratamento.	Mecanismos físicos

Nível de Tratamento	Descrição	Tipo de remoção
Primário	Remoção de sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica.	
Secundário	Remoção da matéria orgânica e eventualmente nutrientes (fósforo e nitrogênio).	Mecanismos biológicos
Terciário	Remoção de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis) ou ainda a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos.	Pode ser físico-químico e biológico

Fonte: Adaptado de Von Sperling (1995).

Existem inúmeros formas de tratamento de secundário, porém para este estudo, o enfoque será no tratamento por processo de lodo ativado.

O sistema de lodos ativados é amplamente utilizado, em nível mundial, para o tratamento de despejos domésticos e industriais, em situações em que são necessários uma elevada qualidade do efluente e reduzidos requisitos de área. No entanto, o sistema de lodos ativados inclui um índice de mecanização superior ao de outros sistemas de tratamento, implicando uma operação mais sofisticada e maiores consumos de energia elétrica (VON SPERLING, 2002).

As seguintes unidades são partes integrantes da etapa biológica do processo de lodo ativado:

- tanque de aeração ou reator biológico: local onde ocorrerão os processos de biodegradação;
- sistema de aeração: fornecimento de oxigênio necessário à biodegradação aeróbia;
- tanque de decantação ou decantador secundário: separação da água tratada da biomassa formada.

A Figura 4 ilustra as etapas desse processo.

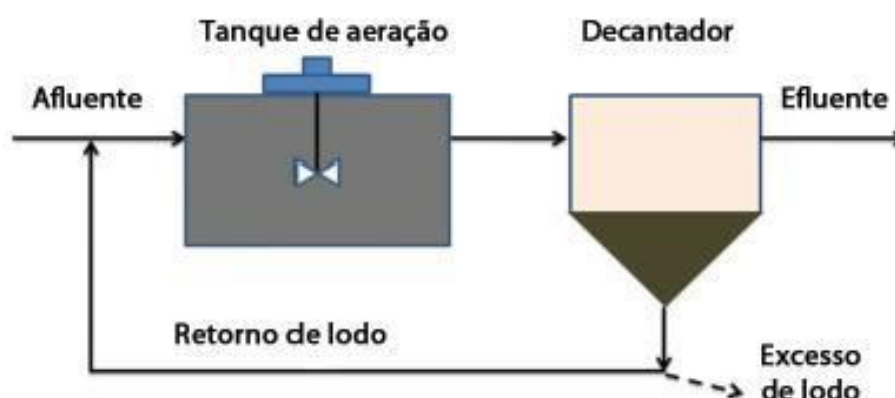


Figura 4 - Representação esquemática do princípio de funcionamento do sistema de lodo ativado

Fonte: Neto (2014).

Segundo Jordão e Pessoa (2014), as variações do processo, juntamente com a forma convencional e suas modalidades principais (Figura 5), são as que seguem:

- O processo convencional sob a modalidade de “fluxo a pistão”: o escoamento se dá ao longo das câmaras de aeração, desde a extremidade de montante até a jusante, e toda a vazão de esgoto se transfere como uma massa única ao longo do sentido longitudinal do escoamento; para esta condição e para que a dispersão longitudinal seja mínima, o tanque de aeração deve ter uma elevada relação comprimento-largura;
- A modalidade de “mistura completa” (batelada): a vazão afluyente alimenta o tanque diretamente sob os rotores de aeração; ocorre uma total dispersão das partículas em todo o tanque de aeração; o tanque de aeração é quadrado ou de baixa relação comprimento-largura;
- A modalidade de “aeração prolongada”: o processo se dá em condições (fase endógena, idade do lodo alta), que o decantador primário pode ser suprimido, resultando um lodo com alto teor de mineralização; nesta modalidade se incluem os “valos de fluxo orbital”.

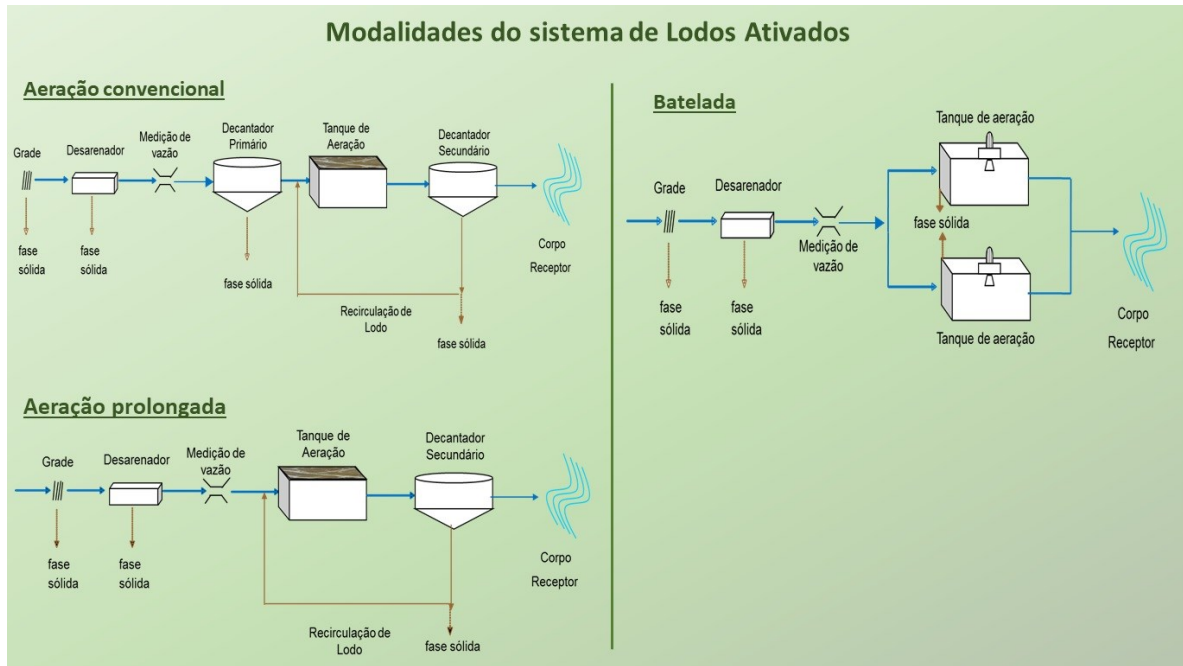


Figura 5 - Modalidades do Sistema de Lodo Ativados

Fonte: H2O Engenharia (2018).

Os modelos de fluxo a pistão e de mistura completa não existem na prática, sendo mais correto referir-se a sistemas de fluxo tendendo a pistão ou tendendo a mistura completa. Na verdade, os casos reais são representados por um fluxo disperso, em que ocorre sempre um certo grau de mistura (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

3.1.4. Padrão de Qualidade e Legislação Ambiental

Os padrões de lançamento variam de acordo com o país e com o estado, refletindo suas particularidades, estágio de desenvolvimento, nível econômico, compromisso com o meio ambiente e diversos fatores. O Quadro 2 apresenta uma síntese de padrões de lançamento, segundo níveis de restrição, para os principais poluentes de interesse dos esgotos domésticos. Dependendo de cada país, região ou situação, poderão ser adotados padrões menos restritivos, restritivos ou bastante restritivos.

Quadro 2 - Padrões de lançamento de efluentes

Parâmetro	Lançamento	Padrão de Lançamento (mg/L)		
		Menos restritivo	Restritivo	Bastante restritivo
DBO	Quaisquer corpos d'água	60	20-30	10

Parâmetro	Lançamento	Padrão de Lançamento (mg/L)		
		Menos restritivo	Restritivo	Bastante restritivo
DQO	Quaisquer corpos d'água	200	100-150	50
SS	Quaisquer corpos d'água	60	20-30	10
N total	Corpos d'água sensíveis	-	10-15	10
P total	Corpos d'água sensíveis	-	1-2	1

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2005).

No Rio Grande do Sul é utilizada a CONSEMA 355/2017, conforme é apresentado no Quadro 3 e Fonte: CONSEMA 355 (2017).

Quadro 4 abaixo.

Quadro 3 - Valores de concentração estabelecidos pela CONSEMA 355/2017 para efluentes sanitários

Faixa de vazão do efluente (m ³ /d)	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Coliformes Termotolerantes	
				NMP/100mL	Eficiência
1 Q<200	120	330	140	-	-
2 200≤Q<500	110	300	100	10 ⁶	90%
3 500≤Q<1.000	80	260	80	10 ⁵	95%
4 1.000≤Q<2.000	70	200	70	10 ⁵	95%
5 2.000≤Q<10.000	60	180	60	10 ⁴	95%
6 10.000≤Q	40	150	50	10 ³	95%

Fonte: CONSEMA 355 (2017).

Quadro 4 - Valores de concentração estabelecidos pela CONSEMA 355/2017 para efluentes sanitários

Faixa de vazão do efluente (m ³ /d)		Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	Fósforo Total	
			mg/L	Eficiência
1	Q < 1.000	20	4	75%
2	1.000 ≤ Q < 2.000	20	3	75%
3	2.000 ≤ Q < 10.000	20	2	75%
4	10.000 ≤ Q	20	1	75%

Fonte: CONSEMA 355 (2017).

A Portaria nº 68/2019 da FEPAM apresenta os valores de padrão de qualidade que o efluente deverá atender para ser disposto em solo. O Quadro 5 apresenta esses valores.

Quadro 5 - Padrão de qualidade do efluente para disposição no solo

Faixa de vazão do efluente (m ³ /dia)	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	pH	Óleos e graxas mineral (mg/L)	Óleos e graxas vegetal ou animal (mg/L)
Q < 200	120	330	140	6 a 9	10	30
200 ≤ Q < 500	100	300	100			
500 ≤ Q < 1000	80	260	80			
1000 ≤ Q < 2000	70	200	70			
2000 ≤ Q < 10000	60	180	60			
10000 ≤ Q	40	150	40			

Fonte: Adaptado de FEPAM N°68 (2019).

A Portaria não apresenta nenhum valor padrão de fósforo, entretanto apresenta alguns valores de nitrogênio. Esses valores são referentes ao efluente disposto no solo, por meio de bacias e valas de infiltração, onde a concentração de nitrogênio total não deverá exceder 25 mg/L (FEPAM N° 68, 2019).

3.1.5. Remoção de Fósforo de Efluentes

O Fósforo (P) é um elemento essencial à vida e tem uma distribuição muito irregular na natureza. Em muitas regiões o P é limitante a produção agrícola e adições periódicas de P se fazem necessárias para produção de alimentos ou fibras. O P inorgânico que é adicionado ao solo como fertilizante tem baixa solubilidade em água e grande interação com partículas do solo. Sendo assim, a recomendação de adubação fosfatada é maior que a necessidade da cultura.

A ocorrência de fósforo em águas naturais e em águas residuárias se dá quase que exclusivamente na forma de fosfato (PO_4^{3-}). Os fosfatos são classificados como ortofosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta-, e outros polifosfatos), além de fosfatos ligados a compostos orgânicos (APHA, 1995).

O P também é considerado um grande poluente de cursos de água, especialmente as águas superficiais, já que pouco ocorre percolação deste elemento. O excesso de P causa a eutrofização, que é o enriquecimento excessivo da água, sendo assim os nutrientes estimulam o crescimento de algas e plantas. Esse fenômeno prejudica a utilização da água, assim como toda a função ambiental do meio aquático, já que o crescimento excessivo de algas pode consumir o oxigênio e causar mortandade de peixes (KLEIN e ANTONINI, 2012).

Na maioria dos processos de remoção de fósforo, ele é convertido em fração sólida, a partir de emprego de coagulantes inorgânicos (processos químicos), e posterior separação a partir de processos como: sedimentação, flotação ou filtração. O P também pode ser removido através de processos biológicos. O produto pode ser: sal insolúvel, massa microbológica no lodo ativado, biomassa em lagoas de tratamento, assim como podem ser adsorvidos em materiais sólidos que tenham afinidade com o íon fósforo. Porém, nesses processos o fósforo removido do meio líquido não estará puro, mas presente em uma mistura com outros produtos. (SHU et al., 2006).

3.1.6. Disposição de esgoto tratado no solo

A disposição de esgoto tratado no solo é uma alternativa para a reciclagem de água e de nutrientes. Além disso, o solo atua como um complemento ao tratamento, principalmente no que se refere à remoção de patógenos e nutrientes. Quando o esgoto tratado é distribuído no solo, ele se infiltra através de pequenos espaços que estão nas camadas mais secas e sem água

(camadas insaturadas). Durante esse percurso, o esgoto recebe um complemento ao tratamento através de processos de natureza física, química e biológica (TONETTI, 2018).

As principais vantagens e desvantagens do uso de sistemas de disposição de efluentes no solo estão resumidas no Quadro 6.

Quadro 6 - Vantagens e Desvantagens de sistemas de disposição de efluente no solo

VANTAGENS	DESVANTAGENS
São sistemas simplificados e que necessitam de pouca manutenção e operação.	Existe uma grande variação da qualidade final do esgoto tratado, pois existe a influência de muitos fatores (clima, tipo de solo, entre outros)
Têm custos de construção e operação menores do que sistemas mais mecanizados, os quais necessitam de bombas, agitadores e aeradores.	A maioria dos sistemas de disposição no solo necessita de uma grande área para sua implantação.
Há a possibilidade de haver a recarga dos aquíferos através da infiltração do esgoto tratado no solo.	Solos muito impermeáveis, com lençol freático próximo à superfície, ou áreas que são alagadas com frequência não possibilitam a infiltração no solo.

Fonte: Adaptado de Tonetti (2018).

Existem algumas alternativas que já são utilizadas para disposição de efluente no solo, como as valas de infiltração e sumidouro, que são citadas pela norma NBR 13969/1997 (ABNT, 1997). A FUNASA (2015) sugere a utilização de círculo de bananeiras, que é outra alternativa para esse fim.

O Círculo de Bananeiras é um sistema utilizado no tratamento de águas cinzas (provenientes de pias, tanques e chuveiros). Para sua construção, deve-se abrir uma vala de 1,4 m de diâmetro e 0,6 m de profundidade, que será preenchida com troncos de madeira pequenos, galhos médios e finos e palhas (capins, folhas), devendo formar um monte acima da borda da vala, de modo que a superfície fique abaulada (EMATER-MG, 2016).

O conhecimento da profundidade do lençol freático é importante para a escolha da disposição final. Quanto mais profundo o lençol, mais segura é a disposição de esgotos no solo e menor a chance de ele contaminar as águas subterrâneas (TONETTI, 2018). No Brasil, a distância mínima sugerida entre o local de aplicação de esgoto tratado no solo (ex: fundo do sumidouro) e o lençol é de 1,5m (ABNT, 1997); porém inúmeras pesquisas demonstram que o esgoto tratado pode percorrer distâncias de até centenas de metros pelo subsolo (USEPA, 2002).

O tipo (textura) de solo é outro aspecto importante e que ajuda a definir o sistema de disposição mais adequado. A textura do solo dependerá das partículas que o compõem, e estas podem ser divididas – conforme o seu tamanho – em argilas, siltes ou areias (IBGE, 2007). Análises de solo para a determinação da sua textura podem ser realizadas em laboratórios especializados.

Segundo Tonetti (2018), no caso de solos arenosos ou com textura média e que tenham uma alta capacidade de infiltração, os círculos de bananeira e as valas de infiltração também podem ser utilizados, mas devem ser feitas adaptações, como colocar uma camada de solo mais argiloso no fundo da vala ou do círculo, de maneira que a infiltração ocorra de forma mais lenta e controlada. Em caso de solos pouco permeáveis, ou seja, com baixa capacidade de infiltração, como os muito argilosos, recomenda-se que sejam empregados:

- a) sistemas de tratamento de esgoto que produzam um esgoto tratado de maior qualidade e que depois haja a disposição nos corpos d'água ou reuso agrícola;
- b) sistemas de tratamento de esgoto que não produzam esgoto tratado (ex: Fossa Verde);
- c) disposição no solo por meio de Vala de Infiltração plantadas, já que as raízes das plantas auxiliam na abertura de canais naturais, facilitando a infiltração do esgoto tratado e a perda de água por evapotranspiração.

Existem alguns tipos de disposição de efluente no solo, que são descritos no Quadro 7.

Quadro 7 - Tipos de disposição de efluente no solo

Tipo	Descrição
Infiltração lenta	Os esgotos são aplicados ao solo, fornecendo água e nutrientes necessários para o crescimento das plantas. Parte do líquido é evaporada, parte percola no solo, e a maior parte é absorvida pelas plantas. As taxas de aplicação no terreno são bem baixas. O líquido pode ser aplicado segundo os métodos da aspersão, do alagamento e da crista e vala.
Infiltração rápida	Os esgotos são dispostos em bacias rasas. O líquido passa pelo fundo poroso e percola pelo solo. A perda pela evaporação é menor face às maiores taxas de aplicação. A aplicação intermitente, proporcionando um período de descanso para o solo. Os tipos mais comuns são: percolação para a água subterrânea, recuperação por drenagem subsuperficial e recuperação por poços freáticos.
Infiltração subsuperficial	O esgoto pré-decantado é aplicado abaixo do nível do solo. Os locais de infiltração são preenchidos com um meio poroso, no qual ocorre o tratamento. Os tipos mais comuns são as valas de infiltração e os sumidouros.
Escoamento superficial	Os esgotos são distribuídos na parte superior de terrenos com certa declividade, através do qual escoam, até serem coletados por valas na parte inferior. A aplicação é intermitente, os tipos de aplicação são: aspersores de alta pressão, aspersores de baixa pressão e tubulações ou canais de distribuição com aberturas intervaladas.

Fonte: Adaptado de Von Sperling (1995).

3.1.7. Reuso de Efluentes na Agricultura

O crescente aumento na necessidade de alimentos exige que tenhamos uma produção cada vez maior. Este aumento de produção pode ser alcançado fazendo com que as plantas expressem o seu máximo potencial produtivo, significando que a água e os nutrientes no solo deverão estar em níveis adequados (LUDWIG, 2012).

A busca por soluções para o constante aumento da população, conseqüentemente aumento da demanda por água e alimentos, apontam para o aproveitamento dos efluentes das estações de tratamento de esgoto na agricultura (CARARO e BOTREL, 2007).

3.1.8. Taxa de Aplicação Superficial (TAS)

O termo Taxa de aplicação hidráulica superficial é definido como a relação entre a vazão de esgoto e a área superficial de uma unidade de tratamento (NBR 13969/97). A importância deste parâmetro em experimentos com leitos filtrantes já foi discutida em algumas pesquisas. Segundo Santos (2015) a diminuição da remoção de matéria orgânica à medida que se aumenta o volume de esgoto aplicado diariamente em um filtro de areia (taxa de aplicação superficial) é notório. No estudo realizado por Cohim (2008), o autor concluiu que o aumento da frequência com que o efluente é aplicado contribui para a eficiência do filtro.

Dentro desse contexto essa pesquisa vai avaliar três TAS distintas para remoção de fósforo total e ortofosfato.

3.2. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Segundo a FEPAM nº 68 de 08/07/2019, valores de referência do solo são as concentrações de diferentes elementos, observadas em uma região anteriormente à disposição de efluentes líquidos no solo ou então presentes de forma natural, sem intervenção antrópica. Sendo assim, a caracterização do mesmo, se faz necessária e de extrema importância nesse contexto.

3.2.1. Características Físicas do Solo

As propriedades físicas do solo (textura, estrutura, densidade, porosidade, permeabilidade, fluxo de água, ar e calor) são responsáveis pelos mecanismos de atenuação física de

poluentes, como filtração e lixiviação, possibilitando ainda condições para que os processos de atenuação química e biológica possam ocorrer (CETESB, 2019).

3.2.1.1. Textura do Solo

O solo é composto por uma fase gasosa, líquida e sólida. A fase sólida é constituída de partículas minerais e orgânicas. A distribuição do tamanho das partículas do solo é referente a quantidade de massa seca do solo, encontrada em cada intervalo de tamanho.

Os cascalhos, calhaus e matacões compõem a fração mais grosseira do solo e são mais comuns em solos pouco desenvolvidos, ainda pouco intemperizados, enquanto a areia, silte e argila, compõem a fração terra fina e estão presentes, em todos os solos, em maior ou menor proporção. A textura do solo refere-se à proporção de areia, silte e argila encontrada no solo (AZEVEDO e DALMOLIN, 2004).

3.2.1.2. Estrutura do Solo

Em condições naturais, as partículas de areia, silte e argila encontram-se aglomeradas em unidade que são referidas como agregados ou unidades estruturais. O termo estrutura refere-se ao tamanho, forma e aspecto do conjunto dos agregados que aparecem naturalmente no solo (LEPSCH, 2010). Características importantes como o fluxo de água no perfil, aeração e densidade do solo são influenciadas pela estrutura (AZEVEDO e DALMOLIN, 2004).

3.2.1.3. Porosidade do Solo

Os poros do solo apresentam variados tamanhos, formas e tortuosidades e é por eles que circulam o ar e a água. Portanto, a porosidade do solo se refere o volume de espaços ocupados por fluidos (gases e líquidos) existentes no solo. De acordo com o diâmetro dos poros, eles podem ser macro poros (diâmetro maior que 0,06mm) ou micro poros (diâmetro menor que 0,06mm).

Os macro poros são importantes porque permitem a aeração e infiltração de água no solo, enquanto que os micro poros são responsáveis pelo armazenamento de água. Solos arenosos apresentam maior quantidade de macro poros e, portanto, elevada permeabilidade com baixa capacidade de retenção de água (AZEVEDO e DALMOLIN, 2004).

3.2.1.4. Densidade do Solo

A densidade do solo expressa a relação entre a massa seca por um determinado volume do solo, portanto leva em conta os poros do solo, sendo, por isso, utilizada para avaliar o impacto de modificações no ambiente sobre o solo. A densidade está relacionada com a estrutura, já que os poros do solo são espaços vazios dentro e entre os agregados. Portanto a degradação da estrutura do solo leva a um aumento da densidade do solo (AZEVEDO e DALMOLIN, 2004).

3.2.1.5. Fluxo de Água no Solo

O movimento da água nos solos se dá em um meio poroso heterogêneo, em que o tamanho, a forma e as conexões entre os vazios e a viscosidade do fluido determinam a velocidade de passagem. Assim, o transporte e mobilidade de poluentes dependem também da forma e tamanho das partículas que compõem um dado solo, assim como do seu grau de compactação.

A água que percola por ação da gravidade, é somente uma parte da água intersticial. Para fins práticos, não há um grande interesse sobre como se processa o escoamento através dos poros, mas sim pelo fluxo resultante através de uma porção de solo, o qual é influenciado pelo coeficiente de permeabilidade, ou seja, pela sua condutividade hidráulica. Este coeficiente é um índice da maior ou menor dificuldade que o solo opõe a percolação de água através de seus poros (CETESB, 2019).

3.2.2. Características Químicas do Solo

As propriedades químicas dos solos (pH, teor de nutrientes, capacidade de troca iônica, condutividade elétrica e matéria orgânica) são, ao lado da atividade biológica, responsáveis pelos principais mecanismos de atenuação de poluentes nesse meio. Entre estes podem ser destacados a adsorção, a fixação química, precipitação, oxidação, troca e a neutralização que invariavelmente ocorrem no solo e através do manejo de suas propriedades podem ser incrementados (CETESB, 2019).

3.2.2.1. Nutrientes

Uma vez que a água e o ar ocupam os espaços porosos do solo, os fatores que influenciam as relações hídricas necessariamente influenciam o arejamento. Isto faz com que as mudanças

no teor de umidade afetem a temperatura do mesmo. A disponibilidade de nutrientes é influenciada pelo balanço entre solo, água e temperatura. Os principais nutrientes minerais que são fornecidos para as plantas, são divididos em três grupos, sendo eles, nutrientes primários (nitrogênio, fósforo e potássio), nutrientes secundários (cálcio, magnésio e enxofre) e os micronutrientes (boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco) (INSTITUTO DA POTASSA & FOSFATO, 1998).

3.2.2.2. Troca Iônica

O fenômeno de troca de íons no solo junto com a fotossíntese são reações que possibilitam a vida na Terra. Os cátions retidos nos colóides podem ser substituídos por outros cátions. O solo é capaz de reter íons positivos e permutá-los por quantidades estequiométricas equivalentes. A capacidade de troca de cátions é dada pela somatória das bases (potássio + cálcio + magnésio + sódio) mais a acidez potencial (alumínio + hidrogênio). A matéria orgânica (húmus) inclui todos os compostos orgânicos, exceto os materiais não decompostos e os organismos vivos (biomassa).

A matéria orgânica pode ajudar no aquecimento do solo, no suprimento de nutriente para as plantas, permite troca de gases, estabiliza a estrutura e aumenta permeabilidade. Os organismos do mesmo são responsáveis pelos processos de decomposição (CETESB, 2019).

3.2.3. Características Microbiológicas

Os maiores grupos de organismos dos solos incluem vírus, fungos, bactérias, algas e macrofauna como artrópodes e protozoários. Esses organismos têm específicos nichos ecológicos e funções, e cada um contribui para várias atividades do ambiente. Os organismos presentes são responsáveis por uma parcela considerável de degradação de compostos, bem como captação de nutrientes (MATTOS, 2015).

3.2.3.1. Respiração basal

Os microrganismos do solo atuam nos processos de decomposição da matéria orgânica, participando diretamente no ciclo biogeoquímico dos nutrientes e, conseqüentemente, mediando a sua disponibilidade no solo (BALOTA, 1997). Assim, a biomassa microbiana total do solo funciona como importante reservatório de vários nutrientes das plantas (GRISI & GRAY, 1986), pois pertence ao componente lábil da matéria orgânica do solo, e possui

atividade influenciada pelas condições bióticas e abióticas, o que permite que o seu acompanhamento reflita possíveis modificações no solo, podendo ser considerada como uma boa indicadora das alterações resultantes do manejo do solo (BALOTA, 1997).

A respiração basal do solo é definida como a soma de todas as funções metabólicas nas quais o dióxido de carbono (CO_2) é produzido. As bactérias e os fungos são os principais responsáveis pela maior liberação de CO_2 via degradação da matéria orgânica. Além disso, a respiração basal possui uma estreita relação com as condições abióticas do solo também, entre elas a umidade, temperatura e aeração (SILVA; AZEVEDO; DE-POLLI; 2007).

3.2.4. Taxa de Infiltração no Solo

O processo de infiltração se efetua quando parte da água chega até a superfície do terreno, atravessando a vegetação direta ou indiretamente penetrando o solo. A água continuará infiltrando até a capacidade e/ou taxa de infiltração ser atingida, isto é, a partir do instante que todos os espaços entre os grânulos estiverem preenchidos (poros), haverá a obstrução na entrada de água. Assim, a água que não infiltrar nos solos ou rochas, escoará superficialmente; quanto à água infiltrada, depois de preencher o déficit de água no solo, poderá gerar um escoamento subsuperficial (MOLINARI, 2004 apud COELHO NETTO, 1994). Sendo assim a taxa de infiltração é expressa por unidade de área do perfil do solo que é infiltrado por unidade de tempo.

3.2.5. Horizontes do Solo

A estrutura de um solo compreende várias camadas horizontais diferentes em cor, textura, composição etc. Cada uma dessas camadas é um horizonte do solo e seu conjunto constitui o que se chama de perfil do solo. Quanto mais distante da rocha-mãe estiver um horizonte, mais intensa ou mais antiga foi a ação da pedogênese.

- Horizonte O – horizonte formado pela matéria orgânica em vias de decomposição, razão de sua cor escura.
- Horizonte A – zona com mistura de matéria orgânica e substâncias minerais, com bastante influência do clima e alta atividade biológica.

- Horizonte B – horizonte caracterizado pela cor forte e pela acumulação de argilas procedentes dos horizontes superiores e também de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.
- Horizonte C – mistura de solo pouco denso com rocha-matriz pouco alterada.
- Horizonte D – rocha matriz sem alteração.

Entre os horizontes A e B é possível, às vezes, delimitar um horizonte E, caracterizado pela remoção de argila, matéria orgânica e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, que vão se acumular no horizonte logo abaixo (BRANCO, 2014).

3.2.6. Saturação do Solo

Após o término da precipitação (chuva ou irrigação), a água que ficou retida nos poros de maior diâmetro será redistribuída para camadas mais profundas do solo. E, com isso, haverá um momento em que os poros de menor diâmetro ficarão, praticamente, cheios de água, enquanto os de maior diâmetro ficarão cheios de ar. Com o solo contendo água e ar em seus poros, em proporções adequadas, cria-se no mesmo uma condição de umidade denominada de Capacidade de Campo (CC) (TEIXEIRA, 2019). Sendo assim um solo está saturado quando todos os seus poros estão preenchidos por água.

3.2.7. Percolação

Parte da água que infiltra através da superfície do solo será evaporada para atmosfera e outra parte será gradativamente armazenada no perfil de solo. Dependendo de alguns parâmetros, como a umidade do solo, em um determinado momento, a capacidade de armazenamento de água do solo poderá ser esgotada, ou seja, ele ficará saturado.

A partir desse momento, devido à ação da gravidade, o excesso de água que infiltrar diretamente será drenado para as camadas mais profundas do solo, indo abastecer os reservatórios subterrâneos. Esse movimento descendente da água no interior do solo, de cima para baixo, é chamado de percolação (TEIXEIRA, 2019).

3.2.8. Permeabilidade do Solo

De acordo com Souza Pinto (2000), o coeficiente de permeabilidade indica a velocidade de percolação da água quando o gradiente hidráulico é igual à unidade. Esta velocidade, também chamada de velocidade de descarga, é calculada dividindo-se a vazão pela área, no caso de um permeâmetro. A velocidade real é obtida dividindo-se a velocidade de percolação pelo índice de vazios do solo estudado.

3.3. ESTADO DA ARTE

Alguns estudos referentes a disposição de efluente tratado no solo foram publicados e utilizados como referências no presente trabalho.

Com o intuito de reduzir a carga de fósforo em efluentes de uma indústria de laticínios, Fragmeier (2015) realizou uma pesquisa, em que foram utilizados dois filtros contendo carvão ativado, areia e brita em diferentes posições, aos quais foram adicionadas duas alíquotas de efluente. Os teores de fósforo encontrados nas amostras após filtração apresentaram reduções de 18,73% e 16,41% para os filtros A e B, respectivamente, o que demonstrou a possibilidade de aplicação desse sistema em uma estação de tratamento de efluentes. A Figura 6 mostra os filtros utilizados.



Figura 6 - Filtros utilizados na pesquisa

Fonte: Fragmeier (2015).

Outra pesquisa realizada nesta linha de estudo, foi feita por Silva (2014) na estação de tratamento de esgoto de Vila Fernando (Guarda, Portugal). O objetivo era constituir uma alternativa para o restabelecimento de volumes de água subterrânea que poderiam ser utilizados para satisfazer parte do consumo, especialmente em regiões de escassez de água ou onde sua qualidade não era adequada para uso. Recolheu-se amostras de solo para análise e como resultado foi constatado que tal solo apresentava características favoráveis à infiltração de água residuária tratada e seria uma alternativa para o restabelecimento de volumes de água subterrânea (SILVA, 2014).

Klein e Antonini (2012) fizeram uma revisão bibliográfica com o objetivo de apresentar aspectos básicos da dinâmica do fósforo no solo, uso como nutriente e potencial poluente. E como conclusão, eles perceberam que a maioria das pesquisas realizadas testam os percentuais de fósforo no solo com um único objetivo: buscar incremento de produtividade em detrimento aos problemas relacionados ao excedente de fósforo utilizado. Porém,

algumas pesquisas demonstraram que a partir de certas doses de fertilizante não se observa o incremento na produtividade.

Uma pesquisa que inspirou o presente trabalho foi a dissertação de Leal (2009), em que um estudo comparativo de leitos percoladores e banhados construídos de fluxo vertical foram aplicados a fim de avaliar a remoção de fósforo em esgoto sanitário. No caso, o autor utilizou duas técnicas para aumentar a remoção de fósforo, sendo elas, plantas com alta taxa de assimilação de fósforo e a outra, utilização de materiais com potencial de remoção de fósforo nos filtros percoladores. Este estudo foi realizado em duas etapas, em que foram utilizadas taxas de aplicação superficiais distintas, além de diferentes meios filtrantes. Foi concluído que as diferentes frações utilizadas não influenciaram na remoção de fósforo, contudo o material com granulometria mais fina teve uma eficiência superior a 85% para fósforo total e ortofosfato em comparação a brita.

Além destes trabalhos, não foram encontrados na literatura mais referências bibliográficas sobre este assunto, evidenciando como o conhecimento sobre a disposição de efluentes no solo é um tópico com potencial para ser explorado. Esta necessidade é atualmente alavancada pela própria existência da Portaria 68/2019 da FEPAM no RS. Assim, a presente pesquisa enquadra-se nesta linha de produção de conhecimento.

4. METODOLOGIA

Os esgotos podem ser aplicados ao solo de modo a depurá-los, fundamentalmente, por um dos seguintes processos: irrigação, infiltração, percolação e escoamento à superfície livre (PAGANINI, 1996). A proposta desta pesquisa foi analisar através do escoamento vertical do efluente no solo.

4.1. LOCALIZAÇÃO E INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido nas instalações do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, localizada na divisa entre os municípios de Porto Alegre e Viamão (Figura 7). A instalação do experimento e as análises de efluente foi feita no laboratório de saneamento do IPH. As análises de solo foram realizadas no laboratório de sedimentos, também na mesma instituição.



Figura 7 - Localização da instalação do experimento

Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

4.1.1. Características do Local de Coleta do Solo

O solo foi coletado nas dependências do IPH, localizado em Porto Alegre. O clima de Porto Alegre é classificado como sub-tropical úmido (Cfa) de acordo com W. Köppen, registrando temperaturas médias do mês mais quente superiores a 22°C e chuvas bem distribuídas ao longo do ano (MORENO, 1961). Em relação a precipitação em Viamão a pluviosidade média anual de 1590 mm e em Porto Alegre é de 1580 mm (CLIMA-DATA,ORG, 2021).

Em contexto geológico, os granitoides do município de Porto Alegre são reconhecidos a partir de cinco unidades graníticas: Granito Viamão, Independência, Canta Galo, Ponta Grossa e Santana (PHILIPP; CAMPOS, 2004).

Os afloramentos do Granito Viamão, que podem ser encontradas no Campus do Vale da UFRGS, indicam que, em geral, ele se encontra alterado, modificando sua cor cinza para tons mais claros de cinza, amarelo e laranja. Além disso, caracteriza-se por sua pequena cobertura (1 a 3m) de solo arenoso, cor castanho claro a alaranjado, seguido por saibro rico em feldspato (PHILIPP; VARGAS; BENEDETTI, 2009).

Na região verifica-se um perfil de solo rico em matéria orgânica ao redor de 20cm de espessura, passando por diferentes tipos de materiais até chegar à rocha granítica, a qual se encontra a uma profundidade geralmente entre 5m e 10m. Na planície fluvial, encontra-se uma camada de silte arenoso alternado com silte argiloso (1,5 a 2,0m de profundidade), passando para areia fina alternada com cascalho (aproximadamente 2,0m de espessura), seguida por rocha alterada com média de 4,0m de profundidade (FUJIMOTO, 2001).

4.2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

4.2.1. Coleta da amostra de solo para a caracterização textural

O processo de coleta da amostra de solos para a caracterização textural seguiu a recomendação técnica do Instituto Agrônomo (2019). O local de coleta foi escolhido pela praticidade de ser dentro da UFRGS e próximo aos laboratórios de sedimentos e saneamento.

Primeiramente foi retirada uma subamostra da camada mais superficial do solo (camada A) e uma subamostra da camada um pouco mais profunda (camada E), em 3 pontos diferentes para se obter uma média da área amostrada. Em cada ponto, foi retirado com uma pá detritos

e restos de cultura. Foi introduzido o trado no solo até a profundidade de 20 cm. A terra da lateral do trado foi descartada, aproveitando apenas a porção central. A Figura 8 mostra o momento de retirada de detritos com a pá.



Figura 8 - Coleta de amostra de solo com auxílio de pá

Fonte: Própria da autora (2021).

Após isso foi transferida a terra do trado para um balde limpo, como pode-se observar na Figura 9. Em seguida, foram quebrados os torrões de terra dentro do balde, retirando pedras, gravetos ou outros resíduos.



Figura 9 - Amostras de solo nos recipientes

Fonte: Própria da autora (2021).

Por fim, foi retirado cerca de 300g de terra do balde e transferida para um saco de plástico limpo (Figura 10). Essa porção de terra (amostra composta) foi enviada ao laboratório de sedimentos, para a realização da análise granulométrica. (INSTITUTO AGRONÔMICO, 2019).



Figura 10 - Amostras de solo nos sacos plásticos prontas para enviar ao laboratório de sedimentos

Fonte: Própria da autora (2021).

4.2.2. Caracterização textural do solo amostrado

As amostras de solo foram levadas ao laboratório de sedimentos onde foi realizada a análise granulométrica pelo método de peneiras e pipetagem, seguindo as diretrizes recomendadas pela NBR 7181/84. O Anexo 1 apresenta os laudos de granulometria do solo, realizados pelo laboratório.

Como já mencionado anteriormente foi realizada coleta de solo de duas camadas em 3 pontos diferentes da mesma área, de acordo com a metodologia proposta pelo Instituto Agrônômico (2019). Sendo assim, os valores referentes à porcentagem de areia e silte, obtidos nas análises granulométricas de cada camada de solo são apresentados na Tabela 7, através de uma média simples e desvio padrão dos 3 pontos de amostragem.

Tabela 7 - Análise Granulométrica e Classificação do tipo de Solo

Solo	Areia		Silte	
	% Média	Desvio Padrão (+-)	% Média	Desvio Padrão (+-)
Camada A	33,44	7,08	47,79	8,69
Camada E	22,72	9,57	38,03	21,27

4.2.3. Coleta das amostras de efluente na ETE São João

As coletas foram realizadas uma vez por semana, sempre no período da manhã, na ETE São João (Figura 11). A coleta foi realizada no decantador secundário do processo de lodo ativado. Ao todo foram 8 semanas de coletas e análises.



Figura 11 – ETE São João Navegantes

Fonte: Própria da autora (2021).

Seguindo as instruções indicadas no Guia nacional de coleta e preservação de amostras (CETESB, 2011), antes de cada coleta foi realizada a ambientação do recipiente, no caso uma bombona de 10 litros. Após a ambientação a bombona era preenchida com o auxílio de um balde, com aproximadamente a metade de sua capacidade, pois não havia necessidade de enche-la completamente (Figura 12).



Figura 12 – Coleta de Efluente

Fonte: Própria da autora (2021).

Posteriormente no laboratório LABSAN o efluente era distribuído em 4 garrafas de 1 litro. Como o efluente era passado pelos filtros às segundas, quartas e sextas, havia uma garrafa reservada por dia e uma extra. Essas amostras ficavam num refrigerador com temperatura controlada sendo assim preservadas de possíveis atividades microbiológicas.

4.2.4. Montagem do filtro com as camadas de solo

Para a estrutura dos filtros foram utilizadas 3 provetas idênticas com um ponto de coleta de água na parte inferior, aproximadamente 2,5 cm da base (Tabela 8). Foram acoplados nesses pontos mangueiras de silicone (Figura 13). Para fechar essas mangueiras foi utilizado um estrangulador de mangueira, para cada filtro.



Figura 13 - Provetas utilizadas no Experimento

Fonte: Própria da autora (2021).

Todas as provetas foram preenchidas com 5,0 cm de brita, com o objetivo de impedir que as camadas de solo saíssem em demasia junto ao percolado, pelo orifício inferior (Figura 14).

Tabela 8 - Dimensões dos Filtros

PROVETA/FILTRO		
diâmetro	4	cm
altura	32	cm
altura Camada A	11	cm
altura Camada E	11	cm

PROVETA/FILTRO		
brita	5	cm
borda livre	5	cm

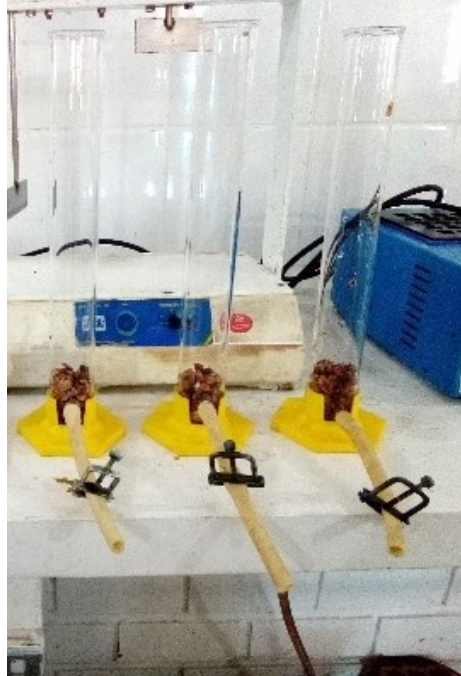


Figura 14 - Provetas preenchidas com brita

Fonte: Própria da autora (2021).

Após serem preenchidos com brita, foi colocado em cada filtro 11 cm de camada de solo do Camada E e 11 cm com solo do Camada A. A Figura 15 mostra as provetas com as camadas de solo utilizadas como meio filtrante no experimento. A disposição do solo nas colunas seguiu a mesma ordem das camadas que estavam na natureza, sendo assim a camada E fica abaixo da camada A. Os três filtros foram montados com a mesma configuração das camadas.



Figura 15 – Provetas preenchidas com as camadas de Solo

Fonte: Própria da autora (2021).

As três (3) provetas foram empregadas para avaliar a remoção de fósforo através da utilização de três (3) valores distintos de taxa de aplicação superficial (TAS) do esgoto tratado na camada de solo. O cálculo da TAS é apresentado pela Equação 1.

$$TAS = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

TAS (L/m².dia) – Taxa de Aplicação Superficial

Q (L/dia) – Vazão do efluente

A (m²)

Com base em pesquisas realizadas com filtração de efluente tratado, foi definida a taxa de aplicação do efluente no solo a ser empregada na presente pesquisa. A carga máxima proposta na literatura (MOLLE et al.,2005; BOUTIN et al., 1997) é de 150 L/m².dia. Além disso inspirada na pesquisa realizada por Kruger (2009) que utilizou taxas de 200 L/m².dia e 300 L/m².dia na sua dissertação já mencionadas no item 3.3 Estado da Arte, optou-se em testar estas mesmas três TAS.

A passagem do efluente pelo filtro foi realizada durante 8 (oito) semanas consecutivas, três vezes por semana (segundas, quartas e sextas-feiras). Optou-se por operar de forma intermitente pois adotou-se duas taxas de aplicação superficial superiores à máxima recomendada na literatura ($150 \text{ L/m}^2\cdot\text{d}$). Assim, a adoção de um dia de intervalo entre aplicações (ou dois dias, durante finais de semana), teve como objetivo de evitar a saturação precoce dos solos.

Foi utilizada uma bomba peristáltica, de forma que as amostras de esgoto passassem pelo filtro, sendo bombeadas com uma vazão de 19 mL/min . O efluente bruto passava pelo filtro em um tempo médio de 15 minutos, variando conforma a TAS (TAS mais alta, mais tempo e vice-versa). Na Figura 16 pode-se observar a bomba referida.



Figura 16 – Bomba utilizada no Experimento

Fonte: Própria da autora (2021).

4.2.5. Análise do efluente bruto e tratado pelo filtro

As amostras do afluente bruto e do efluente tratado pelos filtros foram analisadas sempre no mesmo dia, para minimizar efeitos da armazenagem e de preservação nos valores obtidos dos parâmetros analisados. As análises que foram realizadas e a descrição dos procedimentos são apresentados a seguir.

4.2.5.1. Fósforo Total

A análise de fósforo total foi realizada no efluente coletado da ETE e também no efluente percolado após passar pelos filtros, a fim de comparar a sua efetiva remoção. O método de análise seguido foi o 4500-P do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Primeiramente toda vidraria foi lavada antes de ser usada para determinação de P com ácido sulfúrico 20%, para evitar o efeito de contribuição do P oriundo de detergentes.

A Figura 17 ilustra o procedimento.

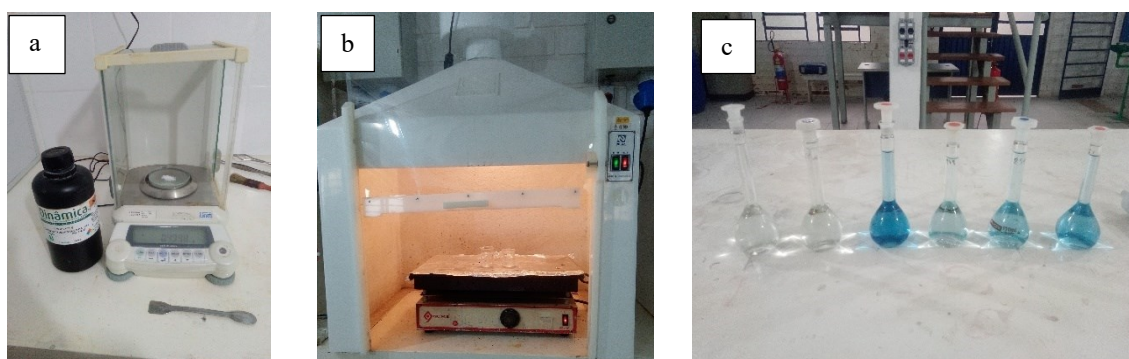


Figura 17 – Procedimento de análise de fósforo: (a) Pesando o persulfato de potássio para adicionar nas amostras; (b) Chapa Elétrica com as amostras e (c) Amostras prontas para passar pelo espectrofotômetro

Fonte: Própria da autora (2021).

O resultado da leitura no espectrofotômetro é utilizado na curva padrão de fósforo do equipamento, que foi calibrado anteriormente pelos técnicos do laboratório (Figura 18). O valor da absorbância da curva no gráfico deve ser multiplicado por dois a fim de se ter o resultado de PO_4 em mg/L.

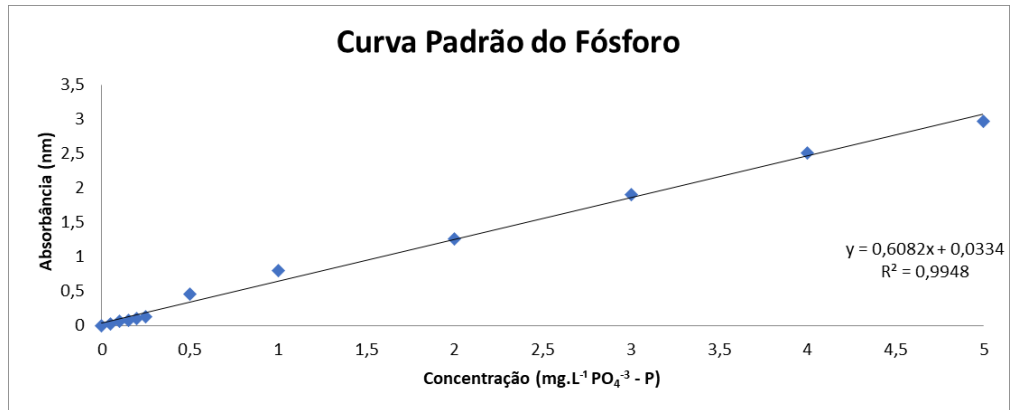


Figura 18 – Curva padrão de calibração do espectrofotômetro

Fonte: LABSAN (2021).

4.5.5.2. Ortofosfato

A análise de ortofosfato foi realizada no efluente coletado da ETE e também no efluente percolado após passar pelos filtros. O método de análise seguido foi o 4500-P do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Primeiramente toda vidraria foi lavada antes de ser usada para determinação de P com ácido sulfúrico 20%, como já descrito anteriormente.

A seguir a Figura 19 ilustra o procedimento.



Figura 19 – Procedimento de análise de ortofosfato: (a) Execução do procedimento de análise de ortofosfato; (b) Amostras de fósforo total e ortofosfato prontas para análise de cor no equipamento e (c) Espectrofotômetro utilizado nas análises de ortofosfato e fósforo total

Fonte: Própria da autora (2021).

O resultado da leitura no espectrofotômetro é comparado com a curva de calibração do equipamento (Figura 18). O valor da absorvância da curva no gráfico da diretamente o resultado de PO₄ em mg/L.

4.2.6. Respiração basal do solo

A respiração basal do solo foi realizada ao final do experimento, decorridas as 8 (oito) semanas de testes, a fim de comparar o desenvolvimento microbiano a partir da passagem do esgoto pelo solo, em cada TAS proposta.

A metodologia foi realizada baseada na publicação Comunicado Técnico 99, da Embrapa, (SILVA; AZEVEDO; DE-POLLI; 2007). Sendo assim, o solo utilizado nos filtros foi pesado e acondicionado em frascos de vidro pequenos de 100 mL. Partindo das amostras de solo previamente pesadas a 25 g, utilizou-se 5 mL de NaOH 1 M, que foram acondicionados com o auxílio de pipeta automática, em novos frascos de vidro de mesmo tamanho (Figura 20).



Figura 20 – Frasco com amostra de solo do filtro e o outro frasco com NaOH

Fonte: Própria da autora (2021).

Transferiu-se imediatamente cada subamostra juntamente com seu respectivo frasco contendo hidróxido de sódio (NaOH) para um frasco de vidro maior, hermeticamente fechado, para que não houvesse entrada de CO₂ do ar externo ou fuga do CO₂ internamente produzido (Figura 19). No vidro contendo NaOH ocorre a reação química, em que o CO₂ produzido pelas bactérias presentes no solo é capturado. Sendo assim, foram dois frascos de vidro pequenos para cada frasco de vidro de grande, sendo que um frasco grande continha apenas o frasco de vidro com NaOH, que serviu de solução controle (branco). Como base de

comparação de análise foi realizado o mesmo procedimento com uma amostra de solo que não recebeu esgoto. O item 3.2.3.1 do referencial teórico apresentou detalhes de como ocorre a respiração basal do solo.



Figura 21 – Frascos com o solo proveniente dos filtros utilizados durante as 8 semanas de experimento

Fonte: Própria da autora (2021).

Após realizar todo o preparo para a incubação das sub-amostras, as mesmas foram mantidas em local isento de luminosidade e com temperatura em torno de 25 a 28°C durante um período de 7 dias. Após o processo de incubação, foi retirado do frasco maior o frasco contendo NaOH e adicionar 2 mL de BaCl₂ 10% (m/v) para a completa precipitação do CO₂, seguido de imediato fechamento do frasco com solução precipitada.

Logo após a precipitação, foi adicionando 2 gotas de fenolftaleína 1% (m/v) e realizada a titulação sob agitação magnética com solução 0,5 M de ácido clorídrico. Ao final da titulação a coloração da solução foi de rosa à incolor, como pode-se observar na Figura 22. O volume de ácido clorídrico gasto na titulação é utilizado para quantificar o CO₂ que reagiu quimicamente com o NaOH.



Figura 22 – Titulação com ácido clorídrico

Fonte: Própria da autora (2021).

O cálculo da respiração basal do solo é dado pela Equação 2.

$$RBS = (((Vb - Va) \times M \times 6 \times 1000) \div Ps \div T \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

- RBS (mg de CO₂/kg de solo. h) - Carbono oriundo da respiração basal do solo;
- Vb (ml) -Volume de ácido clorídrico gasto na titulação da solução controle (branco);
- Va (ml) - Volume gasto na titulação da amostra;
- M - Molaridade exata do HCl;
- Ps - Massa de solo seco; e
- T – Tempo de incubação da amostra em horas.

4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A análise dos resultados de eficiência de remoção de fósforo total e ortofosfato em relação as taxas de aplicação foi realizada utilizando o teste de Tukey através do software Past 4.03. Como o intuito da pesquisa foi realizar a comparação de remoção de fósforo total e

ortofosfato entre as taxas de aplicação, o teste Tukey foi uma ferramenta para analisar se existe diferença significativa entre as mesmas, durante um determinado período.

Ao lado da porcentagem de remoção, são apresentadas letras em formato subscripto, que quando iguais representam que não há diferença significativa e quando as letras são diferentes há diferença significativa entre os valores.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DA ETE SÃO JOAO NAVEGANTES

No início da realização dos testes foram realizadas análises químicas do efluente para a sua caracterização. Contudo, devido a alguns problemas enfrentados no laboratório, como equipamentos estragados e/ou descalibrados por estarem muito tempo parados pelo período de quarentena pela COVID-19 foi necessário adaptar a proposta inicial.

Sendo assim, buscou-se na bibliografia resultados já publicados de análises realizadas na mesma ETE. Por questões burocráticas e de tempo hábil para a realização da pesquisa não foi possível solicitar esses dados a estação de tratamento de esgoto São João. Apesar de não ser a condição ideal, consegue-se ter uma avaliação das principais características do efluente da região atendida por esta ETE.

A tese de doutorado de Barroso Júnior (2020) foi utilizada para consultar os valores referentes ao esgoto bruto coletado na estação em um período frio (como o período que foi realizada a presente pesquisa), durante os anos de 2016 a 2018. A Tabela 9 apresenta a média e o desvio padrão de alguns parâmetros em relação ao efluente bruto.

Tabela 9 - Valores pesquisados na bibliografia para a caracterização do efluente bruto

Parâmetro	Média (anos 2016 a 2018) (mg/L)	Desvio Padrão (+-)
DQO	276	106
DBO	251	52
Fósforo Total	3,3	0,5

Como o efluente utilizado no experimento deste estudo foi coletado após o tratamento com lodo ativado por aeração prolongada, esses dados da Tabela 9 não podem ser utilizados diretamente para a caracterização, pois se trata de efluente bruto. Sendo assim foi calculada a eficiência média de remoção de alguns poluentes pelo sistema de lodo ativado de acordo com valores propostos por Von Sperling (2005), como é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores estimados para caracterização do efluente tratado pelo processo de lodo ativado a partir das eficiências de remoção de poluentes (%) propostas por Von Sperling (2005).

Parâmetro	Eficiência média de remoção (%) Von Sperling (2005)	Concentração estimada do efluente tratado (mg/L)
DQO	83-93	46,9-19,3
DBO	90-97	25,1-7,53
Fósforo Total	<35	2,14

A estimativa realizada desses parâmetros contribui para este estudo, pois mostra o nível de poluição desse efluente, que é condizente com origem doméstica. Conforme já mencionado no item 3.1.4 Padrão de Qualidade e Legislação Ambiental, Von Sperling (2005) classifica em níveis de restrição de padrão de lançamento referentes a alguns parâmetros nos corpos d'água.

Seguindo essa classificação, podemos observar que as concentrações de DBO e DQO estimadas apresentadas na Tabela 10 se encontram dentro dos limites restritivos ou bastante restritivos. Contudo, de acordo com a estimativa, os níveis de fósforo total podem estar acima do padrão de lançamento, sendo assim estes valores são importantes para previsão e planejamento de unidades de tratamento de esgotos que venham a aumentar a eficiência de sua remoção.

5.2. REMOÇÃO DE FÓSFORO E ORTOFOSFATO

5.2.1. Fósforo Total

Para os cálculos de remoção de fósforo total foram utilizados os dados do efluente bruto coletado na ETE. Os dados brutos em mg/L de Fósforo total do percolado e do efluente bruto são apresentados a seguir na Tabela 11. Apesar das análises terem sido ocorridas por 8 semanas, apenas as 3 últimas apresentaram bons valores, com coerência e alguma tendência.

Tabela 11 – Dados de Fósforo Total utilizados no cálculo de % de remoção

SEMANA	AMOSTRA	DATA	FÓSFORO TOTAL (mg/L)		
			150	200	300
6	efluente	21/jun	2		
	coluna	25/jun	0,14	0,23	0,53
7	efluente	28/jun	1,25		

SEMANA	AMOSTRA	DATA	FÓSFORO TOTAL (mg/L)		
			150	200	300
	coluna	02/jul	0,15	0,12	0,34
8	efluente	05/jul	2,23		
	coluna	09/jul	0,01	0,33	0,54

A Figura 23 apresenta a porcentagem de remoção de Fósforo Total durante as últimas três semanas do experimento.

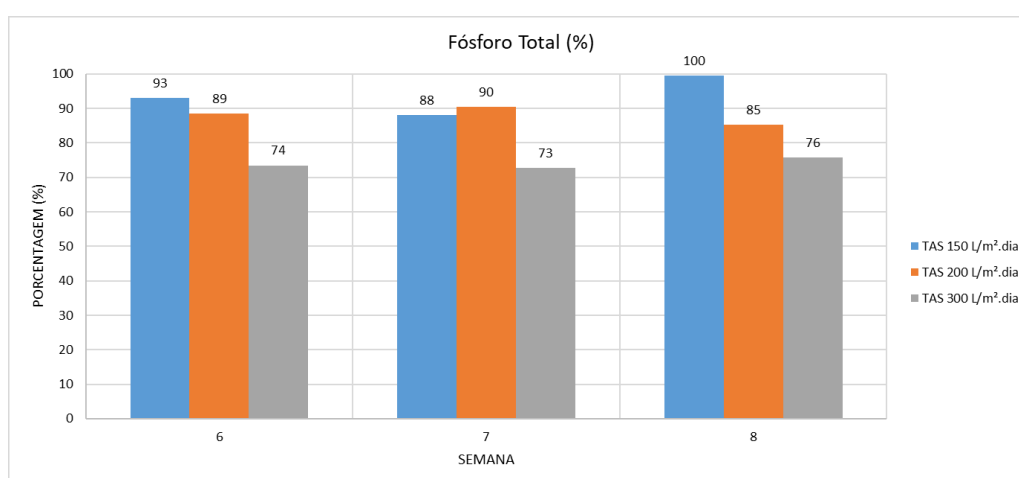


Figura 23 – Remoção de Fósforo Total

Fonte: Própria da autora (2021).

As primeiras cinco semanas não apresentaram bons resultados, que podem ser explicados pelo período necessário para criação do biofilme nas camadas de solo ou por erros de análise. Segundo Missagia (2010) em filtros biológicos percoladores aplicados ao pós-tratamento de efluentes, o biofilme leva 3 a 4 semanas para se estabilizar e ser eficiente na remoção de compostos, durante meses de temperaturas elevadas, e mais de três meses, em baixas temperaturas.

Contudo nas três últimas semanas notou-se uma tendência entre as três TAS utilizadas. Todas as taxas testadas apresentaram uma eficiência de remoção de fósforo total nas últimas três semanas de mais de 70% em comparação com o efluente bruto. Ao comparar com a eficiência de remoção de fósforo total da pesquisa de Leal (2009), que conseguiu 85% com o leito de granulometria fina (areia), percebe-se que os resultados foram satisfatórios, mas podem ser mais analisados utilizando outras granulometrias.

Devido a irregularidade apresentada nos primeiros experimentos, a análise estatística de Tukey foi realizada apenas com os valores referentes as últimas 3 semanas. Conforme a Tabela 12, houve diferença significativa para um $p < 0,05$ entre a taxa 300 L/m³.dia e as outras duas TAS testadas na semana 6 e 7, com $p=0,002$ e $p=0,012$ respectivamente.

Tabela 12 - Eficiência de remoção Fósforo Total (%)

TAS (L/m ³ .dia)	Semana 6	Semana 7	Semana 8
150	93% ^a	88% ^a	100% ^a
200	88,5% ^a	90,4% ^a	85% ^a
300	73,5% ^b	72,8% ^b	76% ^a

5.2.2. Ortofosfato

Para os cálculos de remoção de ortofosfato foram utilizados os dados do efluente bruto coletado na ETE. Os dados brutos em mg/L de ortofosfato do percolado e do efluente bruto são apresentados a seguir na Tabela 13. Assim como o fósforo total aqui será apresentado apenas as últimas 3 semanas dos experimentos, por apresentarem bons valores, com coerência e alguma tendência.

Tabela 13 - Dados de Ortofosfato utilizados no cálculo de % de remoção

SEMANA	AMOSTRA	DATA	ORTOFOSFATO (mg/L)		
			150	200	300
6	efluente	21/jun	2,38		
	coluna	25/jun	0,14	0,26	0,6
7	efluente	28/jun	1,1		
	coluna	03/jul	0,07	0,12	0,28
8	efluente	05/jul	1,55		
	coluna	09/jul	0,13	0,29	0,63

A Figura 24 apresenta a porcentagem de remoção de ortofosfato durante as última três semanas do experimento.

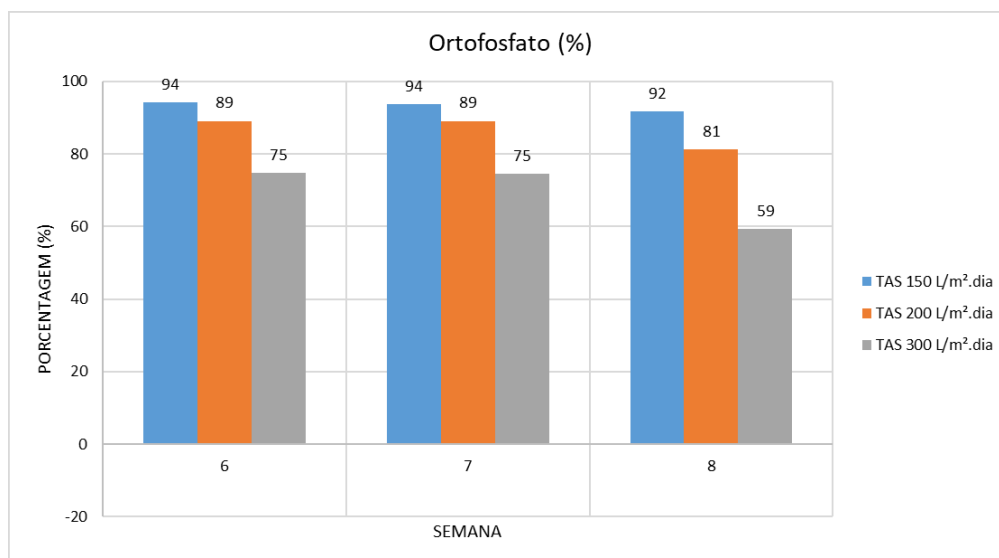


Figura 24 – Remoção de Ortofosfato

Fonte: Própria da autora (2021).

As primeiras semanas não apresentaram uma tendência regular. Isto pode ter a mesma explicação já mencionada no item 5.2.1. Fósforo Total. Sendo pelo período necessário para criação do biofilme nas camadas de solo ou por possíveis erros de análise.

Contudo nas três últimas semanas nota-se uma tendência entre as três TAS utilizadas. Todas as taxas testadas apresentaram uma eficiência de remoção de ortofosfato de pelo menos 59% em comparação com o efluente bruto, nas últimas três semanas. Ao comparar com a eficiência de remoção de ortofosfato da pesquisa de Leal (2009), que conseguiu 85% com o leito de granulometria fina (areia), percebe-se que os resultados foram satisfatórios, mas podem ser mais analisados utilizando outras granulometrias.

Devido a irregularidade apresentada nos primeiros experimentos, a análise estatística de Tukey foi realizada apenas com os valores referentes as últimas 3 (três) semanas. O teste estatístico demonstrou não haver diferença significativa entre as TAS durante o período analisado ($p > 0,05$).

Fazendo a análise de remoção fósforo total e do ortofosfato, que segundo Guidolini (2010), são formados quando os compostos orgânicos sofrem decomposição biológica, pode-se correlacionar com a atividade microbiológica que ocorreu nos filtros. Percebe-se que houve mais eficiência em relação ao fósforo total, sendo assim possivelmente outros processos (químicos e/ou físicos) influenciaram nessa remoção.

5.3. RESPIRAÇÃO BASAL DO SOLO

A Tabela 14 apresenta os resultados referentes a respiração basal do solo retirado dos filtros após as 8 semanas.

Tabela 14 – Respiração Basal do Solo

Amostra de solo	RBS (mg CO₂/Kg solo.h)
Solo do filtro de TAS 150 L/m ² .dia	0,321
Solo do filtro de TAS 200 L/m ² .dia	0,357
Solo do filtro de TAS 300 L/m ² .dia	0,357
Solo bruto	0,214

Os valores apresentados indicam que aparentemente nas três amostras retiradas dos filtros houve um aumento da atividade microbiana no solo, em comparação com o solo bruto. Ainda observa-se que nos filtros com TAS de 200 L/m².dia e 300 L/m².dia a respiração basal do solo foi mais elevada do que na amostra de solo com TAS 150 L/m².dia.

Esses resultados são coerentes se for relacionar a atividade microbiana com a quantidade de efluente filtrado, pois quanto mais nutrientes no solo, a tendência é haver aumento da microbiota. Contudo pode-se perceber que a menor TAS (que apresentou menor RBS, sendo assim contendo menor atividade microbiana) removeu mais fósforo em comparação as demais. Isso mostra que além dos microrganismos, os processos de adsorção do fósforo no solo também podem ter influenciado nessa remoção.

Segundo Achat et al. (2012) a microbiota do solo, onde ocorrem muitos processos biogeoquímicos do ciclo do fósforo, se encontra em maior proporção nas primeiras camadas mais superficiais, devido a densidade de raízes e concentração de matéria orgânica. Como esse experimento foi realizado utilizando camadas superficiais do solo e busca analisar a remoção de fósforo, a análise de respiração basal pode demonstrar intensa atividade microbiana.

6. CONCLUSÕES

Com as análises de eficiência de remoção de poluentes do sistema de lodo ativado realizadas através dos dados de efluente bruto pesquisados na bibliografia, pode-se ter uma noção aproximada de algumas características químicas do efluente. Estes valores são importantes para previsão e planejamento de unidades para tratamento de esgotos que venham a aumentar a eficiência de remoção desses poluentes.

Os resultados de desempenho dos filtros variando a TAS utilizando duas camadas de solo diferentes mostrou que:

- A remoção de fósforo total teve uma eficiência de mais de 70% durante as últimas semanas do experimento, considerando as três taxas de aplicação superficial;
- A remoção de ortofosfato teve uma eficiência de pelo menos 59% durante as últimas semanas do experimento, considerando as três taxas de aplicação superficial;
- A amostra de solo retirada do filtro de TAS 150 L/m².dia apresentou menor RBS, o que mostra que houve menos atividade microbiana no solo, em comparação aos outros filtros com TAS maiores.

Como o fósforo total mede todas as formas de fosfato e apresentou melhores resultados de remoção que o ortofosfato, que é consumido por plantas e bactérias, pode-se intuir que possivelmente houveram outros processos (químicos e/ou físicos) que contribuíram para isto. Outro resultado que corrobora para essa linha de raciocínio é o fato dos filtros com menor atividade microbiana (menor RBS) terem apresentado eficiência superior em remoção de fósforo.

7. RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados e conclusões obtidos, como forma de ampliação e aprofundamento para futuros estudos de filtros compostos com camadas de solo, recomenda-se:

- Analise ser realizada com um tipo de solo mais argiloso, para testar a eficiência de adsorção.
- Realizar análise química do efluente.
- Analise ser realizada por um período de tempo maior, para se avaliar qual o período de saturação e colmatção do solo.
- Avaliar a interferência da brita no processo de filtração do efluente.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1997. 60 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ACHAT, D.L.; AUGUSTO, L; GALLET-BUDYNEK, A.; and BAKKER, M. R.: Drying-induced changes in phosphorus status of soil with contrasting soil organic matter contents- Implications for laboratory approaches, **Geoderma**, 187-188,41-48, 2012.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23. ed. Washington,DC, 2017.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19. ed. Washington,DC, 1995.

ARCEIVALA, S.J. (1981). *Wastewater treatment and disposal. Engineering and ecology in pollution control*. New York, MARcel Dekker. 892 p.

AZEVEDO, Antonio Carlos de ; DALMOLIN, R. S. D. . **Solos e Ambiente: uma introdução**. 2ª. ed. Santa Maria: Editora Pollotti, 2004. v. 1000. 100p .

BADO, C.; PERCIO, E. J. e LINDINO A. C., 2012. **Demanda Química de Oxigênio: Questionamentos** – Revista Analytica, Paraná, 2013.

BALOTA, E. L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D. S. and HUNGRIA, M.. **Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas**. Rev. Bras. Ciênc. Solo [online]. 1997, vol.22, n.4, pp.641-649. ISSN 1806-9657. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831998000400009>.

BARROSO JÚNIOR, J.C.A **Avaliação de lagoas de tratamento com presença de macrófitas flutuantes e microalgas aplicadas ao pós-tratamento de esgoto sanitário em condições de clima subtropical**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

BRANCO, Pércio de Moraes. **Os Solos**. Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2014. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Os-Solos-2620.html>>. Acesso em: 15 de Dezembro de 2019.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Caderno didático técnico para curso de gestão de sistemas de esgotamento sanitário em áreas rurais do Brasil** / Fundação Nacional de Saúde. – Brasília : Funasa, 2020. 53 p.

CARARO, D. C.; BOTREL, T. A. Uso de cloração e ar comprimido no controle do entupimento de gotejadores ocasionado pela aplicação de água residuária. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 336-345, 2007. ISSN 0100-6916. Disponível em: <

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010069162007000300002&nrm=iso >.

CLARK, T.; STEPHENSON, T.; PEARCE, P. A. **Phosphorus removal by chemical precipitation in a biological aerated filter**. In: Water Research, v. 31, n. 10, p. 2557-63, out. 1997.

CLIMA-DATA.ORG. **Clima Porto Alegre (Brasil)**. Disponível em:< <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/porto-alegre-3845/>>. Acessado em: 02 de dezembro de 2021.

CLIMA-DATA.ORG. **Clima Viamão (Brasil)**. Disponível em:< <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/viamao-4502/>>. Acessado em: 02 de dezembro de 2021.

COHIM, E. **Polimento de efluente de UASB com filtros intermitentes de areia**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Bahia, Salvador.2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**, Brasília, 2011.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do Solo**, São Paulo, 2019.

CONSEMA. CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 355 de 19 de julho de 2017**. Critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul.

EMATER-MG. **Círculo de Bananeiras para tratamento de efluentes rurais**. 2016. Disponível em:<<file:///C:/Users/renat/Downloads/CIRCULOZDEZBANANEIRASZPARAZTRATAMENTOZDEZEFLUENTESZRURAIIS.pdf>>. Acesso em: 31 de Janeiro de 2020.

FANGMEIER, M.; GENNARI, A. ; REISDORFER, G. . **Tratamento de fósforo em efluente final com uso de carvão ativado, areia e brita**. Destaques Acadêmicos, v. 7, p. 102-108, 2015.

FUJIMOTO, N. S. V. M. **Análise ambiental urbana na área metropolitana de Porto Alegre – RS: sub-bacia hidrográfica do Arroio Dilúvio**. Tese (Doutorado), Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/72157>>. Acesso em: 16 de Dezembro de 2019.

FUNASA. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Saneamento**. 4. ed. Brasília, 2015. 642 p.

FUNASA. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Disposição no solo como alternativa de tratamento e pós-tratamento de esgoto doméstico para pequenas comunidades**. Fortaleza, 2006. 195 p.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL, 2019. **Portaria nº 68**, Rio Grande do Sul.

GUIDOLINI, J. F.; ABDALA, V. L.; CARMO, D. A. D.; VAL, B. H. P.; JUNIOR, R. F. V. Ortofosfato como Parâmetro Indicador de Qualidade da Água em Diferentes Pontos da Bacia do Rio Uberaba. **III Seminário Iniciação Científica e Inovação Tecnológica**, [S. l.], p. 1,3, 14 out. 2010. Disponível em: https://iftm.edu.br/sin/2010/trabalhos/ges_ortofosfato.pdf. Acesso em: 18 nov. 2021.

GRISI, B.M. & GRAY, T.R.G. **Comparação dos métodos de fumigação, taxa de respiração em resposta à adição de glicose e conteúdo de ATP para estimar a biomassa microbiana do solo**. R. Bras. Ci. Solo, 10:109-115, 1986.

H2O ENGENHARIA, Brasil, 2018. Disponível em:< <http://h2oengenharia.com.br/pt/voce-sabe-como-funciona-o-sistema-de-lodos-ativados-e-quais-sao-as-suas-modalidades/>>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manuais Técnicos em Geociências. Número 4: Manual Técnico de Pedologia**. 2ª edição. Rio de Janeiro. 2007.

INSTITUTO AGRONÔMICO-IAC, **Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais**, Botafogo. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/produtoseservicos/analisedosolo/retiraramostrasolo.php>>. Acesso em: 16 de Dezembro de 2019.

INSTITUTO DA POTASSA & FOSFATO. **Manual internacional de fertilidade do solo / Tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes - - 2 ed., rev. e apl. - - Piracicaba : POTAFOS, 1998.**

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7ª ed. Rio de Janeiro: SEGRAC, 2014.

KLEIN, Claudia ; AGNE, S.A.A.(Sandra Aparecida Antonini Agne) . **Fósforo: De nutriente à poluente**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 8, p. 1713-1721, 2012.

LABORATÓRIO DE SANEAMENTO DA UFRGS-LABISAN. **Curva padrão de calibração do espectrofotômetro**, 2021.

LEAL, F.K. **Estudo comparativo de leitos percoladores e banhados construídos de fluxo vertical aplicados à remoção de fósforo em esgoto sanitário**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,2009.

LEPSH, IGO F. **Formação e conservação dos solos**/Igo F. Lepsch.-2.ed.-São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LUDWIG, R; PUTTI F.F.; BRITO, R. R. **Revisão Sistemática sobre o Uso de Efluentes na Agricultura**. Fórum Ambiental da Alta Paulista. vol.8; São Paulo, 2012.

MATTOS, M. L.T.. Microbiologia do Solo. In: Ramom Rachide Nunes; Maria Olimpia Oliveira Rezende. (Org.). Recurso solo: propriedades e usos. 1ed.São Carlos: Cubo, 2015, v.1, p.250-272.

MENDONÇA, H. V.; RIBEIRO, C. B. M.; BORGES, A. C.; BASTOS, R. R. **Remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuárias de laticínios por sistemas alagados construídos operando em bateladas.** *Amби-Agua*, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 75-87, 2012. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.805>)

METCALF & EDDY (1991). *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse*. Metcalf & Eddy, Inc. 3. ed, 1334 p.

MISSAGIA, B. **Estudo das comunidades bacterianas em Filtros Biológicos Percoladores utilizados para o pós-tratamento de efluentes de um reator UASB.** Tese (doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

MOLLE,P.; LIÉNARD, A; BOUTIN, C.; MERLIN, G; IWMA, A. How to treat raw sewage with constructed wetlands: na overview of the French systems. **Water Science and Technology**, v.51, n.9, p.11-21, 2005.

MOLINARI, D. C.; VIEIRA, A.F.G. . **Capacidade de Infiltração de água no solo e sua relação com o surgimento de processos erosivos acelerados no Distrito Industrial II - Manaus /AM.** In: 6º Congresso Brasileiro de Geógrafos, 2004, Goiânia. Anais do 6º Congresso Brasileiro de Geógrafos. Goiânia, 2004. p. 1-7.

MORENO, J. A. Clima do Rio Grande do Sul. **Boletim Geográfico do Estado do Rio Grande do Sul**, n. 11, 1961. Disponível em: <<https://revistas.fee.tche.br/index.php/boletim-geografico-rs/article/view/3236>>. Acesso em: 16 de Dezembro de 2019.

NETO, Henrique Martins. **Tratamento de efluentes na indústria de papel e celulose.** Revista TAE, 07 de Fevereiro de 2014 . Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/7197-noticias>>. Acesso em: 16 de Dezembro de 2019.

PAGANINI. **Disposição de esgoto no solo, através de escoamento à superfície, com utilização de gramíneas: avaliação do processo quanto aos aspectos sanitários, operacionais, construtivos e de manutenção.** São Paulo, 1996. p.1-367.

PHILLIP, R. P.; CAMPOS, R. S. Geologia, Petrografia e Litogeoquímica dos Gnaisses Porto Alegre, RS, Brasil: Implicações Geotectônicas. **Revista Pesquisas em Geociências**, v. 31, n. 2, p. 79-94, 2004. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/igeo/pesquisas/3102/06-3102.pdf>>. Acesso em: 16 de Dezembro de 2019.

PHILLIP, R. P.; VARGAS, J. A.; BENEDETTI, V. D.. S. A memória geológica do centro antigo de Porto Alegre: o registro da evolução urbana nos prédios históricos e no urbanismo da cidade. **Revista Pesquisas em Geociências**, v. 36, n. 1, p. 59-77, 2009. Disponível em: <<http://colossus.ufrgs.br/igeo/pesquisas/3601/06-3601.pdf>>. Acesso em: 16 de Dezembro de 2019.

QASIM, S.R. (1985). *Wastewater treatment plants: planning, design and operation*. Holt, Rinehart and Winston, New York.

SABESP, 2019. **Tratamento de esgotos**. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=49>>. Acesso em 16 de Dezembro de 2019.

SANTOS R. A. **Efeito da Taxa de Aplicação Superficial na Remoção de Matéria Orgânica em Filtros de Areia**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

SHU, L. et al. **An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant**. In: Bioresource Technology, v. 97, n. 17, p. 2211-16, nov. 2006.

SILVA C. E. **Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais**. UFSM/CT/HDS, 2012.

SILVA, E. E.; AZEVEDO; P. H. S.; DE-POLLI, H.. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂)**. Comunicado Técnico 99. Embrapa. 2007.

SILVA F. 2014. **Caracterização de solos para infiltração de efluente de estação de tratamento de esgoto** – Revista Eng. Sanit ambient, Portugal, 2016.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO - SNIS, **Esgotamento Sanitário - 2019**. Ministério do Desenvolvimento Regional, 2018. Disponível em: <<http://snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-esgotamento-sanitario>>. Acesso em: 10 de Outubro de 2021.

SOUZA PINTO, C. de. 2000. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo. Oficina de textos, 247p.

TEIXEIRA, Silvana. **Solos saturados são propícios ao desenvolvimento de plantas?**. Cursos CPT, 08 de Setembro de 2019. Disponível em: <<https://www.cpt.com.br/cursos-irrigacao-agricultura/artigos/solos-saturados-sao-propicios-ao-desenvolvimento-de-plantas>>. Acesso em: 16 de Dezembro de 2019.

TONETTI, Adriano Luiz, 1973- **Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas: referencial para a escolha de soluções**. /Ana Lucia Brasil, Francisco José Peña y Lillo Madrid, et al. -- Campinas, SP.: Biblioteca/Unicamp, 2018.

USEPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA/625/R-00/008 (NTIS PB02-108560): **ONSITE WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS MANUAL - REVISED FEBRUARY 2002**. [s.i.]: U.s. Environmental Protection Agency, 2002. 369 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3º Edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2005. 452 p.

VON SPERLING, M.. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. Vol. 4. Lodos Ativados. 2.ed.. 2. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2002. v. 1. 428p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e EVAGE ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1995. 240 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1).

ANEXO 1- LAUDO DE GRANULOMETRIA

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P3 - HE

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem

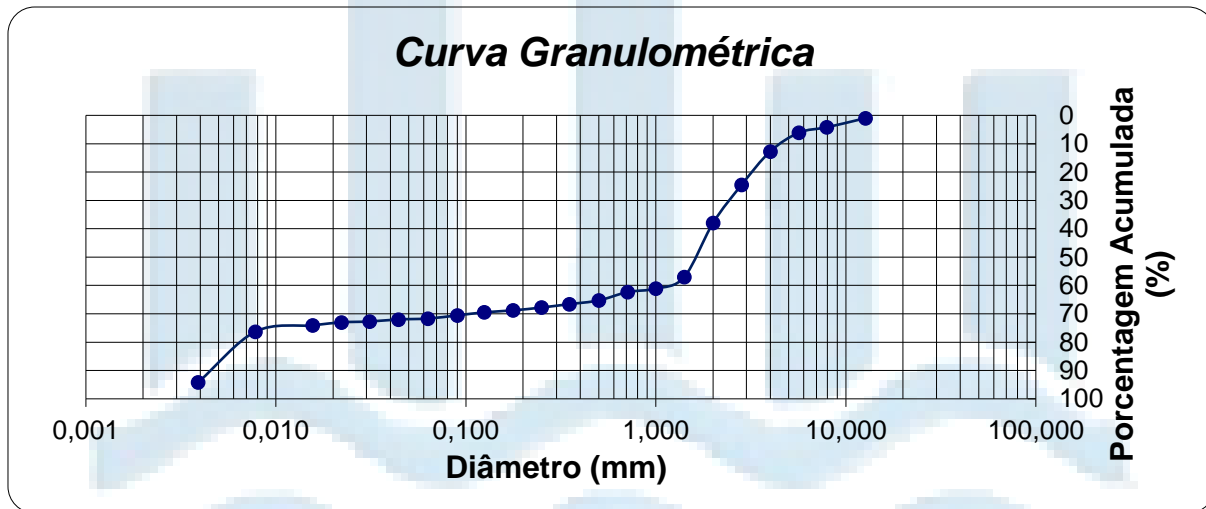
Diâmetro (mm)	Peso (g)	Somatório do peso (g)	Porcentagem por fração (%)	Porcentagem acumulada (%)
12,7000	4,5900	4,5900	0,9740	0,9740
7,9300	15,3000	19,8900	3,2466	4,2206
5,6600	8,9300	28,8200	1,8949	6,1155
4,0000	31,1300	59,9500	6,6057	12,7212
2,8300	55,3700	115,3200	11,7494	24,4706
2,0000	63,5600	178,8800	13,4872	37,9578
1,4100	89,9500	268,8300	19,0871	57,0449
1,0000	19,2800	288,1100	4,0912	61,1361
0,7100	5,6100	293,7200	1,1904	62,3265
0,5000	13,9700	307,6900	2,9644	65,2909
0,3500	6,1000	313,7900	1,2944	66,5853
0,2500	5,6900	319,4800	1,2074	67,7927
0,1770	4,7300	324,2100	1,0037	68,7964
0,1250	3,2300	327,4400	0,6854	69,4818
0,0900	5,0800	332,5200	1,0780	70,5598
0,0630	5,2600	337,7800	1,1162	71,6759
0,0442	1,4700	339,2500	0,3119	71,9879
0,0312	3,4200	342,6700	0,7257	72,7136
0,0221	1,4300	344,1000	0,3034	73,0170
0,0156	5,0100	349,1100	1,0631	74,0801
0,0078	10,3900	359,5000	2,2047	76,2849
0,0039	84,2700	443,7700	17,8818	94,1667
≤0,0020	27,4900	471,2600	5,8333	100,0000

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P3 - HE

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem



Nilza Maria dos Reis Castro
CREA RS 067929

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P1 - HA

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem

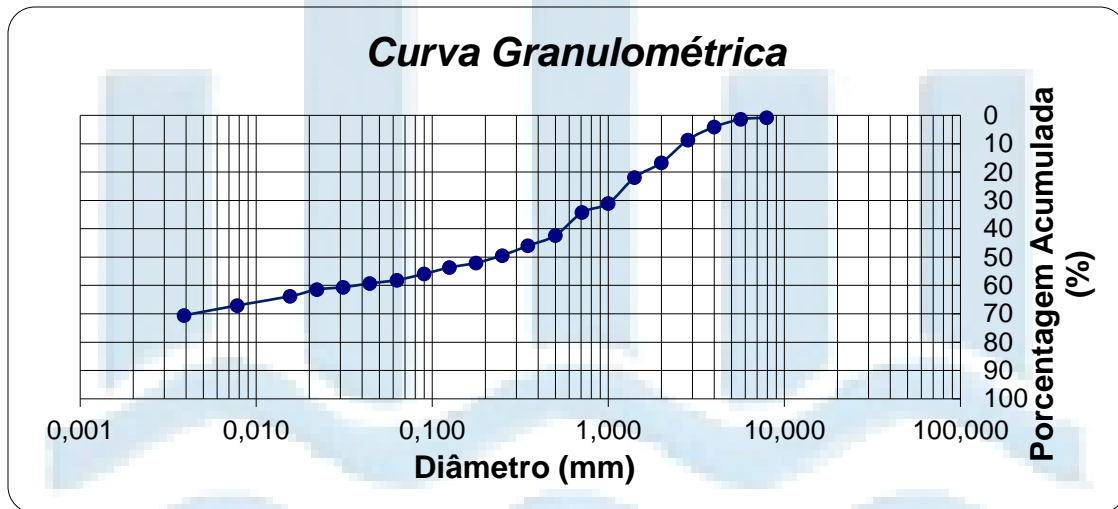
Diâmetro (mm)	Peso (g)	Somatório do peso (g)	Porcentagem por fração (%)	Porcentagem acumulada (%)
7,9300	1,5300	1,5300	0,8373	0,8373
5,6600	1,0100	2,5400	0,5527	1,3900
4,0000	4,9300	7,4700	2,6980	4,0880
2,8300	8,3500	15,8200	4,5696	8,6576
2,0000	14,7800	30,6000	8,0884	16,7460
1,4100	9,3800	39,9800	5,1333	21,8793
1,0000	16,7500	56,7300	9,1665	31,0458
0,7100	5,8500	62,5800	3,2014	34,2473
0,5000	14,8500	77,4300	8,1267	42,3740
0,3500	6,5700	84,0000	3,5955	45,9695
0,2500	6,2700	90,2700	3,4313	49,4008
0,1770	4,8400	95,1100	2,6487	52,0495
0,1250	2,9500	98,0600	1,6144	53,6639
0,0900	4,1400	102,2000	2,2656	55,9295
0,0630	3,9700	106,1700	2,1726	58,1021
0,0442	2,1400	108,3100	1,1711	59,2732
0,0312	2,4700	110,7800	1,3517	60,6250
0,0221	1,5000	112,2800	0,8209	61,4458
0,0156	4,2900	116,5700	2,3477	63,7936
0,0078	5,9500	122,5200	3,2562	67,0497
0,0039	6,3900	128,9100	3,4970	70,5467
≤0,0020	53,8200	182,7300	29,4533	100,0000

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P1 - HA

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem



Nilza Maria dos Reis Castro
CREA RS 067929

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P2 - HA

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem

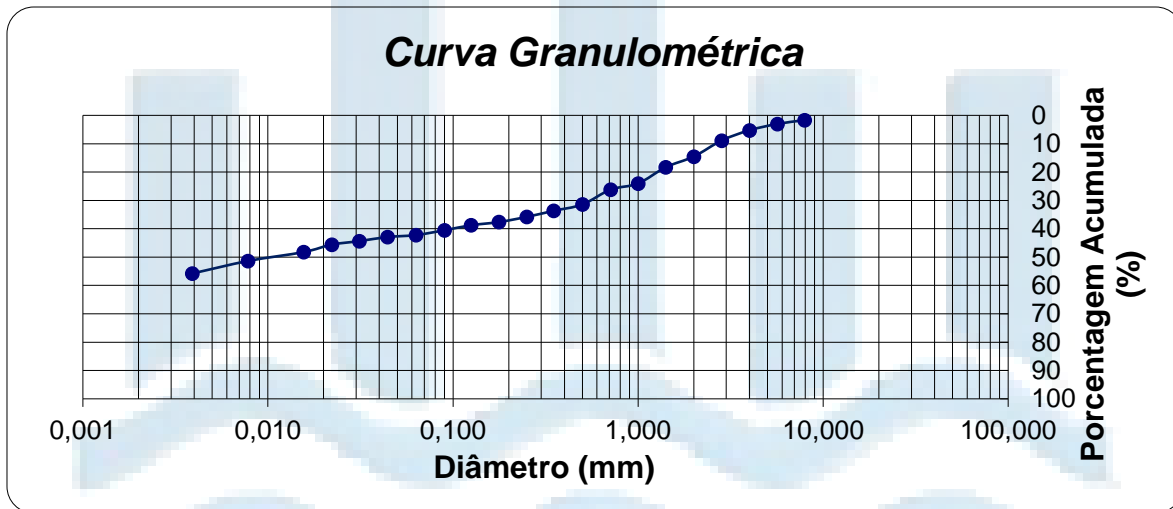
Diâmetro (mm)	Peso (g)	Somatório do peso (g)	Porcentagem por fração (%)	Porcentagem acumulada (%)
7,9300	3,2900	3,2900	1,7046	1,7046
5,6600	2,5600	5,8500	1,3264	3,0309
4,0000	4,3100	10,1600	2,2330	5,2640
2,8300	6,9700	17,1300	3,6112	8,8752
2,0000	10,9200	28,0500	5,6577	14,5329
1,4100	7,2800	35,3300	3,7718	18,3048
1,0000	11,0600	46,3900	5,7303	24,0350
0,7100	4,1600	50,5500	2,1553	26,1904
0,5000	10,1200	60,6700	5,2433	31,4336
0,3500	4,3000	64,9700	2,2279	33,6615
0,2500	4,1700	69,1400	2,1605	35,8220
0,1770	3,5200	72,6600	1,8237	37,6457
0,1250	2,1700	74,8300	1,1243	38,7700
0,0900	3,4100	78,2400	1,7667	40,5368
0,0630	3,2600	81,5000	1,6890	42,2258
0,0442	1,3700	82,8700	0,7098	42,9356
0,0312	2,7400	85,6100	1,4196	44,3552
0,0221	2,4200	88,0300	1,2538	45,6090
0,0156	5,0400	93,0700	2,6113	48,2203
0,0078	6,0800	99,1500	3,1501	51,3704
0,0039	8,5000	107,6500	4,4039	55,7743
≤0,0020	85,3600	193,0100	44,2257	100,0000

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P2 - HA

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem



Nilza Maria dos Reis Castro
CREA RS 067929

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P1 - HE

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem

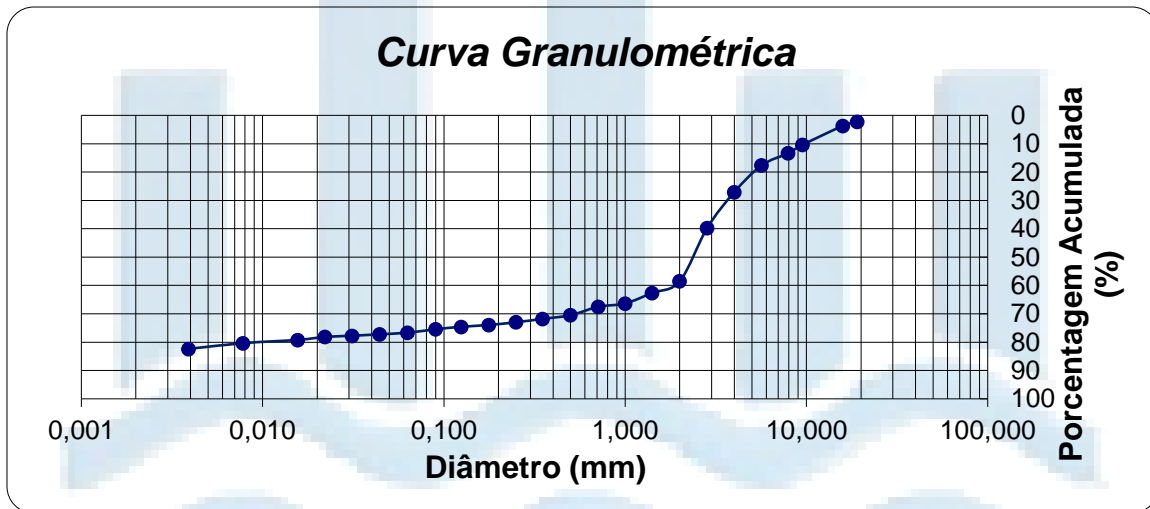
Diâmetro (mm)	Peso (g)	Somatório do peso (g)	Porcentagem por fração (%)	Porcentagem acumulada (%)
19,1000	11,0500	11,0500	2,2151	2,2151
15,9000	7,3100	18,3600	1,4654	3,6805
9,5200	33,4800	51,8400	6,7114	10,3919
7,9300	14,8000	66,6400	2,9668	13,3587
5,6600	21,3200	87,9600	4,2738	17,6326
4,0000	47,1200	135,0800	9,4457	27,0783
2,8300	63,4500	198,5300	12,7193	39,7975
2,0000	93,4400	291,9700	18,7311	58,5286
1,4100	20,4100	312,3800	4,0914	62,6200
1,0000	18,5600	330,9400	3,7206	66,3406
0,7100	5,8900	336,8300	1,1807	67,5213
0,5000	14,7800	351,6100	2,9628	70,4841
0,3500	6,5300	358,1400	1,3090	71,7931
0,2500	5,9400	364,0800	1,1907	72,9839
0,1770	4,7500	368,8300	0,9522	73,9361
0,1250	3,2100	372,0400	0,6435	74,5795
0,0900	4,3900	376,4300	0,8800	75,4596
0,0630	5,9800	382,4100	1,1988	76,6583
0,0442	2,8700	385,2800	0,5753	77,2336
0,0312	2,5500	387,8300	0,5112	77,7448
0,0221	2,1000	389,9300	0,4210	78,1658
0,0156	5,2200	395,1500	1,0464	79,2122
0,0078	5,7000	400,8500	1,1426	80,3548
0,0039	10,1900	411,0400	2,0427	82,3975
≤0,0020	87,8100	498,8500	17,6025	100,0000

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P1 - HE

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem



Nilza Maria dos Reis Castro
CREA RS 067929

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P2 - HE

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem

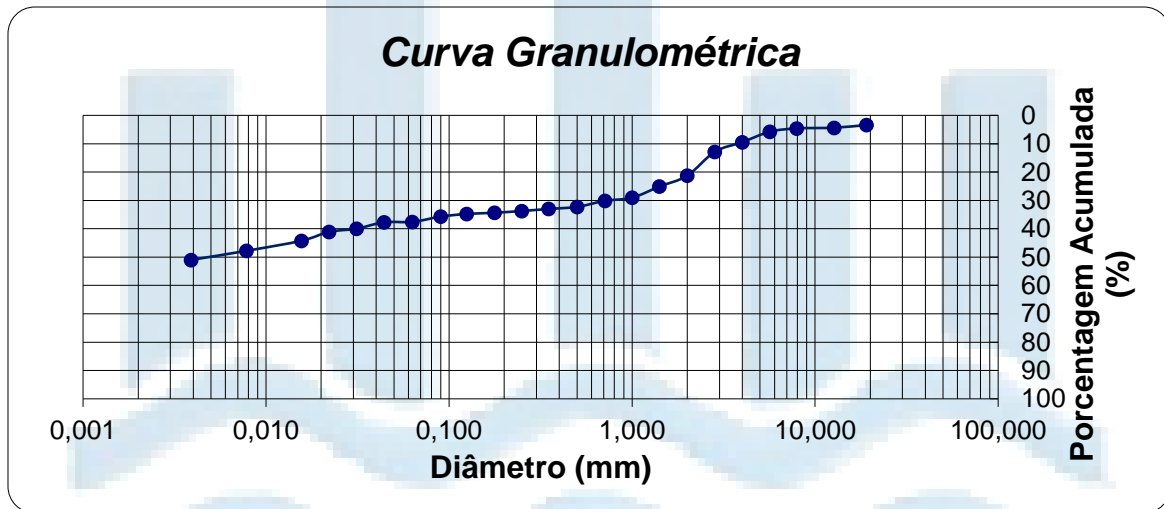
Diâmetro (mm)	Peso (g)	Somatório do peso (g)	Porcentagem por fração (%)	Porcentagem acumulada (%)
19,1000	8,8700	8,8700	3,4083	3,4083
12,7000	2,4500	11,3200	0,9414	4,3497
7,9300	0,6900	12,0100	0,2651	4,6148
5,6600	3,0300	15,0400	1,1643	5,7791
4,0000	9,5400	24,5800	3,6657	9,4448
2,8300	8,8900	33,4700	3,4159	12,8607
2,0000	21,8900	55,3600	8,4111	21,2719
1,4100	10,0100	65,3700	3,8463	25,1182
1,0000	10,1900	75,5600	3,9155	29,0336
0,7100	2,9500	78,5100	1,1335	30,1671
0,5000	5,4900	84,0000	2,1095	32,2767
0,3500	1,9400	85,9400	0,7454	33,0221
0,2500	1,8400	87,7800	0,7070	33,7291
0,1770	1,6700	89,4500	0,6417	34,3708
0,1250	1,0600	90,5100	0,4073	34,7781
0,0900	2,4500	92,9600	0,9414	35,7195
0,0630	4,8400	97,8000	1,8598	37,5793
0,0442	0,3600	98,1600	0,1383	37,7176
0,0312	5,8700	104,0300	2,2555	39,9731
0,0221	2,9400	106,9700	1,1297	41,1028
0,0156	8,1600	115,1300	3,1354	44,2382
0,0078	9,2500	124,3800	3,5543	47,7925
0,0039	8,3200	132,7000	3,1969	50,9894
≤0,0020	127,5500	260,2500	49,0106	100,0000

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P2 - HE

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem



Nilza Maria dos Reis Castro
CREA RS 067929

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P3 - HA

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem

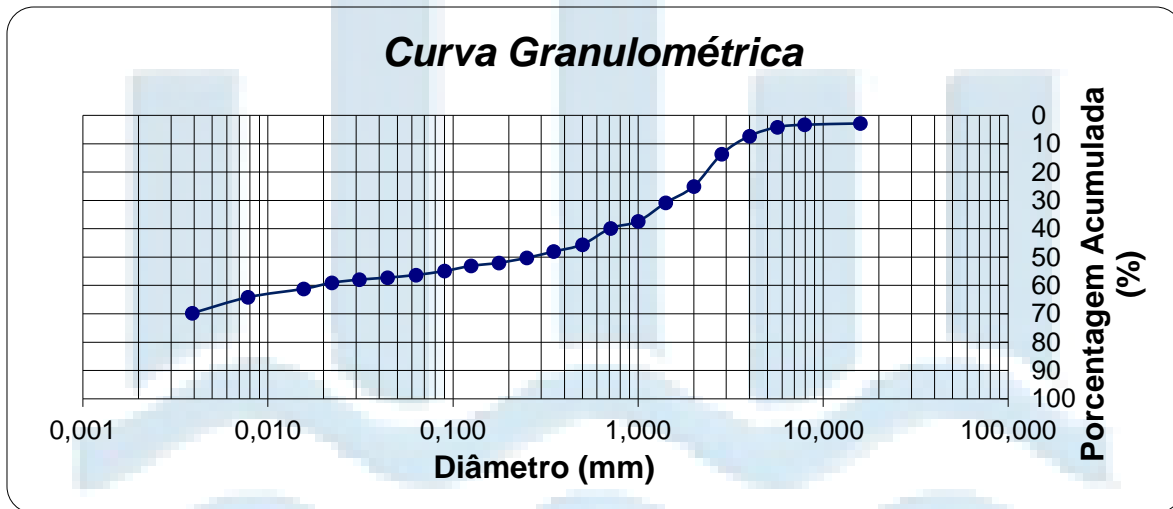
Diâmetro (mm)	Peso (g)	Somatório do peso (g)	Porcentagem por fração (%)	Porcentagem acumulada (%)
15,9000	7,0700	7,0700	2,8626	2,8626
7,9300	1,1200	8,1900	0,4535	3,3161
5,6600	2,0900	10,2800	0,8462	4,1623
4,0000	7,7300	18,0100	3,1298	7,2921
2,8300	15,7200	33,7300	6,3649	13,6570
2,0000	28,1000	61,8300	11,3774	25,0344
1,4100	14,3200	76,1500	5,7980	30,8325
1,0000	16,2400	92,3900	6,5754	37,4079
0,7100	5,9700	98,3600	2,4172	39,8251
0,5000	14,1800	112,5400	5,7414	45,5664
0,3500	6,0900	118,6300	2,4658	48,0322
0,2500	5,5500	124,1800	2,2471	50,2794
0,1770	4,2900	128,4700	1,7370	52,0164
0,1250	2,7200	131,1900	1,1013	53,1177
0,0900	4,4000	135,5900	1,7815	54,8992
0,0630	3,4700	139,0600	1,4050	56,3042
0,0442	2,3100	141,3700	0,9353	57,2395
0,0312	1,7400	143,1100	0,7045	57,9440
0,0221	2,7500	145,8600	1,1135	59,0574
0,0156	5,2600	151,1200	2,1297	61,1871
0,0078	7,3700	158,4900	2,9840	64,1712
0,0039	13,8100	172,3000	5,5915	69,7627
≤0,0020	74,6800	246,9800	30,2373	100,0000

LAUDO DE GRANULOMETRIA

CLIENTE: RENATA MARIN

AMOSTRA: P3 - HA

MÉTODO DE ANÁLISE GRANULOMÉTRICA: Peneiras e Pipetagem



Nilza Maria dos Reis Castro
CREA RS 067929