

**UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL**  
**DOUTORADO**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**Daniel Brinckmann Teixeira**

**AVALIAÇÃO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO  
TERCIÁRIO DE ESGOTO DOMÉSTICO EM RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR**

**Santa Cruz do Sul, RS**

**2024**

Daniel Brinckmann Teixeira

**AVALIAÇÃO DE *WETLANDS* CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO  
TERCIÁRIO DE ESGOTO DOMÉSTICO EM RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR**

Projeto de Tese de Doutorado apresentado  
ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e  
Tecnologia Ambiental, como requisito para  
obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Ênio Leandro Machado  
Coorientador: Prof. Dr. Antônio Domingues Benetti

Santa Cruz do Sul, RS

2024

Dedico esse trabalho àqueles que acreditam na engenharia, na tecnologia e na gestão ambiental como ferramenta eficaz para planejar e consolidar a sustentabilidade (econômica, social, política, espiritual, ambiental) nas atividades (urbanas, agrícolas, florestais, industriais, de serviços) da sociedade contemporânea. Somos responsáveis pelo desenvolvimento – sustentável – de nossa própria comunidade.

## AGRADECIMENTOS

É mais honesto sentir do que dizer que sente, no entanto, é chegado o momento de agradecer!

Obrigado ao Pai do céu pelas bênçãos imperceptíveis e por nunca ter me colocado na “pilha de ferro velho”. As pedras no caminho? Agradeço e guardo todas porque estou construindo o meu castelo.

À minha família, esposa Val e filha Benta, por ser/estar comigo auxiliando a coletar os frutos no caminho que fazemos ao caminhar. Alguns nem tão doces assim é bem verdade, mas diante da vastidão do tempo e da imensidão do universo, me sinto honrado em dividir um planeta e essa época (casa, carro, apartamento e cachorros incluídos) com vocês meus amores (e com o filho que ainda não veio também).

Ao Jauneval de Oliveira (*in memoriam*), meu sogro Jonas, que nos deixou cedo demais e não está aqui para comemorar nossas vitórias. Essa e as que seguirão.

À minha bisa Iveta Ziemann (*in memoriam*) e minha Vó Nuti (*in memoriam*) pelos cafés, pelo chimarrão diário antes de embarcar para a UNISC e pelas fofocas realizadas sempre em alemão (para que os netos não percebessem). Que saudade da aurora da minha vida, da minha infância querida, que os tempos não trazem mais. *Ich liebe dich, meine Lieblinge*

Aos meus irmãos: mano Carlos (*in memoriam*), mano Alan, mano Digo (Jacomini), Dudu, Airton, Neusa e Natália, mesmo que andemos nos falando muito pouco ultimamente, considero vocês pois sempre foram nota dez.

Aos colegas do Laboratório de Tecnologias em Tratamento de Águas e Efluentes - LATTAE: Maurício Kersting, Helem Kopp, Guilherme Iepsen e Déryck Karsburg, as dádivas feitas com carinho dobram de tamanho.

Aos colegas da turma de doutorado pelo auxílio nos trabalhos das disciplinas e no conduzir da tese. Ao doutor Gustavo Colares pelo modelo de cientista que é. Aos colegas da graduação Leandro Nunes Pereira, José Paulo Braccini e Renan Kohler. Aos colegas de formatura 2/2009: Elder Dettenborn, Marcos Almeida, Leonardo Benvegnú, Vinicius Dalenogare e Dargel Rech pela companhia na marcha e tantas memórias indeléveis. Inexoravelmente, sinto bastante saudade de estar com vocês e de conceitos como lixiviado, volatilização, reatores, taxas de reação, operações unitárias, solubilizado e tempo de meia vida. Agradeço aos demais com que dividi salas de aula nas últimas duas décadas, foi imensa a satisfação.

Aos colegas de curso e de instituição, Ramiro Bisognin, Daniela De Lara e Robson Bohrer: que Boa Sorte a nossa de ter a lida que nos permite viver e que privilégio servir as ciências ambientais ao lado de vocês.

Aos colegas docentes e técnicos administrativos da unidade Hortênsias – São Francisco de Paula, pelo apoio nas atividades desenvolvidas na área de ensino, pesquisa e extensão.

Aos alunos com quem antes de ensinar, aprendo, me atualizo e posso assim mudar de opinião sobre tudo. Na companhia de vocês pude perceber que a verdadeira evolução do ser passa por mudar de opinião sobre tudo, inclusive sobre si mesmo, substituindo até mesmo aqueles conceitos que, hoje, nos pareçam insubstituíveis.

Ao pessoal de São Francisco de Paula, Candelária, Porto Alegre e Santa Cruz do Sul: Júlio Stelmach (supressão de exóticas), Capitão Berreta (supressão de exóticas), Carlos Padilha (Rádio Comunidade 87,9 - entrevistas, gravações de áudios e auxílio na divulgação), Bráulio Oliveira (Rádio Clube Canela 88,5 - entrevistas e auxílio na divulgação), Demétrio Ribeiro (edição de áudio e vídeo), Mateus Reis (mapas e imagens drone), Eduardo Bellmann e Jarbas do Prado (Central Analítica), Thiago Bjerck (químico colega do mestrado), Mateus Dias (do tempo de Banrisul), Mateus Beise (biólogo desde sempre), Marquion Vaz, Mebur Bardini e Adilson Becker (Engenharia Ambiental); Jésus Genro (Colégio Medianeira), Jéferson Krug (Colégio Concórdia - ULBRA), Felipe Berlato (restaurante Pasta Nostra), Murilo Damé (restaurante 22), Henrique Spall (Corvo), Marcel Wollmann (cadete), Roberto Gewher (Betinho), Diego Becker (Alemão), Tiago Pereira e Vinícius Pereira (os de fé). Sinto-me grato em poder chamar cada um de amigo. A vida os trouxe e, mesmo que por vezes ela nos afaste novamente, a amizade permanece. Vocês muito me auxiliaram nessa etapa profissional e, sobretudo, enquanto pessoa, em variadas fases de minha vida. Quero que a estrada venha sempre até vocês e que o vento esteja sempre soprando a favor.

Aos que contribuíram diretamente (alunos, colegas e amigos): Prof. Leonardo (reitor), Rafael Marques (Marques ProAgro), Redemac (Élvio), Ederson Carvalho (Resolve Assessoria), Homero Lopes (técnico CREA/RS), Eng. Josué Beutler (Mahindra), Diego Trindade (Cabana Hostel) e Max Cavalheiro (Gazin). Que mais amigos iguais a vocês possam cruzar meu caminho.

Ao Michel e Luciana Munhoz que me receberam, em 2011 em Porto Alegre, durante o mestrado, auxiliando que eu chegasse até aqui.

Impossível esquecer também aqueles amigos que já não estão presentes fisicamente entre nós – mas sempre amparando – pois quem passa em nossas vidas nunca nos abandona a sós, deixa um pouco de si e leva muito de nós. Amém.

Agradecimento muito mais do que especial e um abraço carinhoso para o seu Orlando Teixeira (*in memoriam*), meu pai, e Sirlei Beatris Brinckmann, minha mãe, pela vida e por viabilizar as condições para o vestibular em 2003 ingressando no curso de Engenharia Ambiental realizando o sonho de ser Engenheiro pela Universidade de Santa Cruz do Sul. Ali naqueles corredores e salas de aula, entre visitas técnicas, saídas de campo, TCC's, estágios, intercâmbios, congressos, apresentações orais, confecção de pôsteres, relatórios (parciais/finais) e experimentos práticos em laboratório, conheci alguns dos profissionais que me inspiram. Aprendi a acreditar na essência do fazer engenharia e a confiar em mim mesmo quando todos de mim duvidavam. Aprendi a não me deixar fatigar e resumir o pensamento a perseguir um único objetivo: evoluir, sendo melhor do que eu era ontem.

Dessa maneira é necessário fazer reverência exclusiva a Prof. Adriane de Assis Lawisch Rodríguez que, juntamente com a Prof. Cláudia Mendes Mählmann, depositaram em mim peculiar voto de confiança, no ano de 2005, me concedendo bolsa de iniciação científica da FAPERGS. Agradeço diariamente pela existência de vocês pois, a oportunidade de integrar o grupo de pesquisa em reciclagem de plásticos foi e vai continuar sendo a essência de minha formação técnica e humana. Obrigado por nunca desistir de mim e pelas vezes em que me corrigiram. Agradeço por direcionar minha formação fazendo com que eu seja, hoje de fato e de direito, melhor do que era ontem.

Ao Prof. Ênio Machado, meu orientador, obrigado mestre pelo teu trabalho e por me orientar. Quando iniciei a graduação e, mesmo após a formatura, nem em meus melhores planos e intenções acreditei que chegaria a esse nível – doutorado – de graduação. Agradeço o apoio nessa labuta diária pois o senhor já preconizava isso desde o início do curso – que viriam títulos e honrarias. Em abril próximo são 20 anos completos dedicados a Engenharia Ambiental. Completos no sentido amplo e literal, sem espaço para vaidades.

Ao Prof. Antônio Benetti (Iph/UFRGS), meu coorientador, que conheci em 2018 e, desde então, tive a oportunidade de trabalhar em conjunto (tese, bancas, grupo de pesquisa, projetos), és um modelo de pesquisador para mim, para nós estudantes.

À Prof<sup>a</sup>. Rosana Schneider pelo trabalho dedicado em orientar a formação desde a disciplina de Química Ambiental do curso de Engenharia Ambiental no ano de 2006 e, também, pela condução do PPG em Tecnologia Ambiental.

Aos professores Carlos Lutterbeck, Eduardo Lobo e Alexandre Rieger (UNISC), Marçal Pires (PUC/RS) e Günther Gehlen (FEEVALE) pelas diretrizes, auxílios, correções e orientações determinantes para essa caminhada. Ao Prof. Eduardo Bello (UDESC) por aceitar compor a banca examinadora.

Agradeço aos importantes professores que tive no ensino inicial, fundamental e médio: Fabiana Porto (tia Fabi pré), Alveni Santos (primeira série), Danieta Heinen (segunda série), Carla Bernhardt Trindade (terceira série), Adriane do Prado (tia Dica), Eny Silva e Ruth Anton Bredow (matemática), Betina Klafke Mahl (biologia), Maria Elena Schwengber (literatura), Vanessa Zanon Baldissareli (química), Anderson Ellwanger (física), Cristian Thier e Lauro Gomes (educação física), Mara Neto (educação artística) e Mirete Ferreira (ensino religioso). Revisito constantemente os ensinamentos talhados pois é essa a base de toda minha formação. Levo a atitude de cada um de vocês comigo e assim permanecerá.

Aos professores da graduação, especialização, mestrado e doutorado: Diosnel Lopez, Liane Kipper, Jair e Marisa Putzke, Aline Loretto, Ruben Pazos (*in memoriam*), Linea Schütz, Vera Bordin, Liliane Marquardt, Adilson Costa, Marcelino Hoppe, Jorge André, Wolmar Severo, Geraldo Crosseti (*in memoriam*), Davi Back, Benhur e Hércules Borges, Lisi Azambuja, Virgínia Klein, Ruth Santana, Dionei Delevatti, Fábio Rocha, Walter Freitas, Moisés Wollmann, Marco Hansen e Cilon Kipper (*in memoriam*), foi intenso aprendizado estar em sala de aula com cada um de vocês mestres. E um prêmio maior ainda poder ter sido, após a formatura, colega de docência de alguns.

Na pessoa desses mestres agradeço aos demais professores de outras instituições que me auxiliaram no decorrer da formação e, em especial, do trabalho de tese. Agradeço aos professores que tive, tenho e ainda terei.

Ao grupo Wetlands Brasil (Prof. Pablo Sezerino) que promove o Simpósio Brasileiro sobre Wetlands Construídos a cada dois anos. Ao grupo da rede Pan Americana de Sistemas Humedales por suscitar terreno fértil para divulgar e debater nossas ideias e ideais.

À BakofTec Engenharia, na pessoa do Eng. Ambiental Rodrigo e do sócio proprietário Alysson Bakof, por fornecer tecnologia brasileira de ponta para tratamento de águas e efluentes em território nacional. Agradeço pela gentileza em disponibilizar o

sistema de tratamento preliminar, primário e secundário (caixas de gordura e gradeamento e RAFA/FAFA – modelo Tucunará 600L).

À Universidade de Santa Cruz do Sul por me proporcionar acesso ao mundo.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) por oportunizar bolsa para título de mestre (2010-2012) e bolsa para título de doutor (2020-2024). Obrigado Brasil – verás que um filho teu não foge à luta – por investir no poder transformador da educação que nos permite a liberdade com ordem e progresso.

À Universidade Estadual do Rio Grande do Sul: eu te amo UERGS. Nunca foi só dinheiro/*status*, foi pelo agir com o coração tendo muito mais sorte que juízo.

Através da universidade me formei Engenheiro, tornei-me Professor, estou Mestre e, agora, apto a ser Doutor e seguir para descobrir se “quem sabe lá nos trópicos a vida esteja a mil”.

Duas estradas se bifurcaram bem no meio da minha vida, ouvi um sábio dizer: peguei a estrada menos usada e isso fez toda a diferença, a cada noite e a cada dia. E, assim, foi muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias mesmo me expondo a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito e nem sofrem muito, porque vivem nesta penumbra cinzenta que não conhece nem derrota e nem vitória.

O plantio foi feito a muitas mãos e a colheita será farta. Ela será possível devido a existência de cada uma das pessoas citadas - muito provável esqueci alguns nomes - que são valiosas para mim. Após esse período de silêncio e solidão para concluir o trabalho, que eu tenha saúde e tempo para retribuir cada um à altura estando junto para celebrarmos essa existência. Servimos com o nosso melhor e encerramos com a certeza no ofício.

*“We are the champions!”*.

*As ideias que encontramos nos livros são como um fogo. Arrancamos da casa dos vizinhos, alimentamos em nossa casa, transmitimos a outros e ele passa a pertencer a todos, pois não existe nenhuma receita pronta que garanta o êxito em matéria de desenvolvimento, no entanto, existem duas afirmações que podemos fazer: se o desenvolvimento se encontra em nosso futuro não será com as ideias do passado que o alcançaremos e, se o desenvolvimento é produto da comunidade, não serão outros a não ser seus próprios membros que o construirão.*

*(Voltaire/Boissier)*

## RESUMO

### AVALIAÇÃO DE WETLANDS CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO TERCIÁRIO DE ESGOTO DOMÉSTICO EM RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR

Nessa tese são elencados aspectos construtivos e operacionais para concepção de um sistema híbrido (caixas de gordura/gradeamento, reator/filtro anaeróbios e *Wetlands* Construídos – vertical, horizontal e floating) para tratamento de esgoto doméstico, detalhando as etapas de dimensionamento, instalação, partida e monitoramento da performance ambiental. O sistema de CWs operou de maneira descentralizada atendendo a uma residência urbana unifamiliar (06 pessoas padrão de geração alto). As inovações da pesquisa trazem as diferentes configurações que a combinação de projetos já normatizados estabeleceram. O trabalho resultou em três capítulos da tese que serão publicados no formato de artigos técnicos científicos (I: revisão de literatura; II: layout operacional, pegada hídrica e avaliação da performance ambiental e III: dimensionamento, instalação, Análise de Ciclo de Vida (ACV) e pegada de carbono). Dessa maneira o trabalho aponta os principais impactos ambientais associados a implantação de CWs em unidade residencial unifamiliar, bem como, define as matrizes (energia e matéria-prima) impactadas quando da utilização dessa ecotecnologia. Os valores de pegada hídrica do efluente bruto em relação ao efluente tratado reduziram em aproximadamente 90%. As máximas eficiências de remoção apresentadas foram: fósforo total 91%, DQO 85%, nitrogênio amoniacal 71%, turbidez 91%, salinidade 75%, condutividade 77%. Os CWs apresentam boa eficiência de remoção atendendo os limites estabelecidos pela legislação local, no que diz respeito a concentração ou eficiência de remoção para faixa de vazão apresentada. O custo de instalação e operação foi, respectivamente, de US\$ 160 por m<sup>2</sup> e US\$ 3 mensais para o período. A redução da genotoxicidade foi obtida no tratado possibilitando reuso.

**Palavras-chave:** *Wetlands* Construídos, Análise do Ciclo de Vida, Pegada de Carbono, Pegada Hídrica, Residência unifamiliar.

## ABSTRACT

### EVALUATION OF WETLANDS BUILT IN TERTIARY TREATMENT OF DOMESTIC SEWAGE IN SINGLE-FAMILY RESIDENCE

This thesis lists constructive and operational aspects for the design of a hybrid system (grease traps/grating, anaerobic reactor/filter and Constructed Wetlands – vertical, horizontal and floating) for domestic sewage treatment, detailing the steps of sizing, installation, start-up and monitoring environmental performance. The CW system operated in a decentralized manner serving a single-family urban residence (06 people, high generation standard). The research innovations bring the different configurations that the combination of already standardized projects established. The work resulted in three chapters of the thesis that will be published in the format of technical scientific articles (I: literature review; II: operational layout, water footprint and environmental performance assessment and III: sizing, installation, Life Cycle Analysis (LCA) ) and carbon footprint). In this way, the work highlights the main environmental impacts associated with the implementation of CWs in single-family residential units, as well as defining the matrices (energy and raw materials) impacted when this ecotechnology is used. The water footprint values of the raw effluent in relation to the treated effluent reduced by approximately 90%. The maximum removal efficiencies presented were: total phosphorus 91%, COD 85%, ammonia nitrogen 71%, turbidity 91%, salinity 75% and conductivity 77 %. The CWs have good removal efficiency, meeting the limits established by local legislation, with regard to concentration or removal efficiency for the flow range presented. The installation and operation costs were, respectively, US\$160 per m<sup>2</sup> and US\$3 per month for the period. The reduction in genotoxicity was obtained in the treaty, enabling reuse.

**Keywords:** *Constructed Wetlands, Life Cycle Analysis, Carbon Footprint, Water Footprint, Single Family Home.*

## LISTA DE TABELAS

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Tabela 1 | Constituintes e concentrações nos esgotos (fortes, médios e fracos). | 25 |
| Tabela 2 | Principais organismos causadores de doenças.                         | 26 |
| Tabela 3 | Padrões de qualidade da água de reuso para fins urbanos.             | 31 |
| Tabela 4 | Descrição dos 14 pontos monitorados semanalmente.                    | 54 |
| Tabela 5 | Descrição dos equipamentos utilizados.                               | 55 |

## LISTA DE FIGURAS

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | Sistemas de saneamento para comunidades de até 5000 habitantes.                | 28 |
| Figura 2  | Configurações possíveis de CWs.  | 30 |
| Figura 3  | Indicação do município localizado na região nordeste do Rio Grande do Sul.     | 38 |
| Figura 4  | UCs beneficiadas (direta ou indiretamente) pela área de influência do projeto. | 39 |
| Figura 5  | Mapa do condomínio registrado junto ao cartório e secretarias municipais.      | 40 |
| Figura 6  | Residência unifamiliar objeto do estudo.                                       | 41 |
| Figura 7  | Remoção de árvores exóticas resultando em maior incidência solar na área.      | 42 |
| Figura 8  | Sistema sanitário (TEVAP) utilizado na residência entre 2017 e 2022.           | 42 |
| Figura 9  | Segregação na fonte geradora das diferentes fases do esgoto doméstico.         | 43 |
| Figura 10 | Fluxograma simplificado do sistema de tratamento completo.                     | 44 |
| Figura 11 | Indicação das caixas de gordura e gradeamento.                                 | 45 |
| Figura 12 | Tratamento preliminar, primário/secundário.                                    | 46 |
| Figura 13 | Detalhe do homogeneizador geral e registro para controle do fluxo.             | 46 |
| Figura 14 | Sistema híbrido de tratamento terciário em WC.                                 | 47 |
| Figura 15 | Vala de infiltração final.   | 47 |
| Figura 16 | Indicação dos registros e gabaritos dentro das caixas de saída                 | 48 |
| Figura 17 | Fluxograma do sistema de tratamento: volumes, áreas e taxas de aplicação.      | 49 |
| Figura 18 | Inserção de mudas matrizes iniciais.   | 50 |
| Figura 19 | Ação de ajuste do nível e replantio.   | 51 |
| Figura 20 | Estágio atual do desenvolvimento das plantas.                                  | 51 |
| Figura 21 | Detalhe da vala de infiltração que atua enquanto disposição final.             | 52 |
| Figura 22 | Estágio atual de desenvolvimento das plantas na vala de infiltração.           | 52 |
| Figura 23 | Floração das plantas na vala de infiltração final.                             | 53 |
| Figura 24 | Área de obtenção das plantas da espécie <i>Thypha dominguensis</i> .           | 53 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|                  |   |
|------------------|---|
| ACV              | Análise de Ciclo de Vida                                |
| COT              | Carbono Orgânico Total                                  |
| CORSAN           | Companhia Rio-grandense de Abastecimento                |
| CONSEMA          | Conselho Estadual de Meio Ambiente                      |
| CONAMA           | Conselho Nacional de Meio Ambiente                      |
| DBO <sub>5</sub> | Demanda Bioquímica de Oxigênio                          |
| DQO              | Demanda Química de Oxigênio                             |
| DEs              | Disruptores Endócrinos                                  |
| DN               | Diâmetro Nominal  |
| ETE              | Estação de Tratamento de Efluentes                      |
| ETA              | Estação de Tratamento de Água                           |
| FAFA             | Filtro Anaeróbio de Fluxo Ascendente                    |
| P                | Fósforo   |
| FUNASA           | Fundação Nacional de Saúde                              |
| GEE              | Gases de Efeito Estufa                                  |
| GESAD            | Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado          |
| IBGE             | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística         |
| ICV              | Inventário de Ciclo de Via                              |
| IPTU             | Imposto Territorial Urbano                              |
| IWA              | <i>International Water Association</i>                  |
| ICMBio           | Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade |
| MMA              | Ministério do Meio Ambiente                             |
| N                | Nitrogênio  |
| NBR              | Norma Brasileira  |
| ODS              | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável                |
| ODM              | Objetivos do Desenvolvimento do Milênio                 |
| ONU              | Organização das Nações Unidas                           |
| PLANSAB          | Plano Nacional de Saneamento Básico                     |
| PLANESAN-RS      | Plano Estadual de Saneamento do Rio Grande do Sul       |
| PRFV             | Plástico Reforçado com Fibras de Vidro                  |
| RAFA             | Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente                    |

|        |  |
|--------|--|
| PUC/RS | Pontifícia Universidade Católica/RS  |
| RS     | Rio Grande do Sul  |
| SFP    | São Francisco de Paula   |
| SISBIO | Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade                      |
| SS     | Sólidos Suspensos  |
| SBN    | Soluções Baseadas na Natureza  |
| TEVAP  | Tanque de Evapotranspiração  |
| UERGS  | Universidade Estadual do Rio Grande do Sul                                 |
| UFRGS  | Universidade Federal do Rio Grande do Sul                                  |
| UFSC   | Universidade Federal de Santa Catarina                                     |
| UNISC  | Universidade de Santa Cruz do Sul  |
| UCs    | Unidades de Conservação  |
| CWs    | <i>Wetlands</i> Construídos  |
| WCH    | <i>Wetland</i> Construído Horizontal                                       |
| WCV    | <i>Wetland</i> Construído Vertical   |
| WCVFSS | <i>Wetland</i> Construído Vertical de Fluxo Subsuperficial                 |
| WCHFSS | <i>Wetland</i> Construído Horizontal de Fluxo Subsuperficial               |
| WCF    | <i>Wetland</i> Construído de Fluxo Superficial Livre – “ <i>floating</i> ” |

## SUMÁRIO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | INTRODUÇÃO   | 18 |
| 2     | OBJETIVOS  | 22 |
|       | 2.1 Objetivo geral   | 22 |
|       | 2.2 Objetivos específicos  | 22 |
| 3     | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA  | 23 |
| 3.1   | Problemática ambiental   | 23 |
| 3.2   | Esgoto doméstico: caracterização geral   | 23 |
| 3.3   | Unidades de Saneamento Descentralizadas a Extensamente Descentralizadas  | 27 |
| 3.4   | <i>Wetlands</i> Construídos  | 28 |
| 3.5   | Diretrizes para reuso da água, do lodo e das plantas de sistemas de saneamento   | 30 |
| 3.6   | Legislação ambiental pertinente  | 33 |
| 3.6.1 | Resoluções federais e estaduais  | 33 |
| 3.6.2 | Normas brasileiras ordinárias  | 34 |
| 3.6.3 | Diretrizes brasileiras extraordinárias   | 35 |
| 3.6.4 | Políticas públicas e diretrizes gerais para saneamento   | 36 |
| 4     | METODOLOGIA  | 38 |
| 4.1   | Localização e detalhamento da área de estudo   | 38 |
| 4.2   | Concepção do sistema com definição do fluxograma geral   | 43 |
| 4.3   | Testes pré-operacionais, inserção das plantas e início de operação do sistema  | 49 |
| 4.4   | Monitoramento ambiental  | 54 |
| 4.5   | Processamento da informação  | 55 |
| 5     | ARTIGO I - ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA: SANEAMENTO DESCENTRALIZADO COM APLICAÇÃO DE WETLANDS CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS ( <i>Science of The Total Environment</i> – em elaboração com previsão de submissão abril 2024)            | 56 |
| 6     | ARTIGO II - SANEAMENTO DESCENTRALIZADO: DETALHAMENTO DE LAYOUT E OPERAÇÃO COM AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE AMBIENTAL DE WETLANDS CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO ( <i>Journal of Ecological Engineering</i> – submetido em março 2024) | 57 |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 7  | ARTIGO III - WASTEWATER TREATMENT IN SINGLE FAMILY SCALE WITH FLOATING CONSTRUCTED WETLAND ASSOCIATED IN INTEGRATED SYSTEM: LIFE CYCLE ANALYSIS AND CARBON FOOTPRINT IN THE CONSTRUCTION AND START-UP STAGES ( <i>Journal of Cleaner Production</i> – submetido em janeiro 2024) | 58 |
| 8  | CONSIDERAÇÕES FINAIS   | 59 |
| 9  | PERSPECTIVAS FUTURAS   | 61 |
| 10 | ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O DOUTORADO   | 63 |
| 11 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS   | 64 |
| A  | DESENHOS AUTOCAD COM VISTAS DO PROJETO   | 70 |
| B  | TABELAS COM DETALHAMENTO CONSTRUTIVO DOS WETLANDS  | 79 |

## 1 INTRODUÇÃO

Tanto casas, cidades, aglomerados urbanos, processos industriais, agrícolas e florestais, bem como, a prestação de inúmeros serviços fundamentais (hospitais, escritórios, repartições, padarias, tinturarias, necrotérios, cemitérios, consultórios médicos, consultórios dentários, mineração, medicamentos farmacêuticos, atividades de estética/cosmetologias atividades militares, clínicas veterinárias, etc.) e também supérfluos (bares, casas noturnas, sorveterias, parques de diversões, circos, eventos de curta/longa duração como shows) acabam gerando efluentes heterogêneos de ampla complexidade (macro e micropoluentes emergentes e/ou persistentes).

Os desafios para gestão e gerenciamento sustentáveis das águas trazem a referência da própria Constituição Federal brasileira de 1988, que versa, em seu artigo nº 225, sobre o direito ao meio ambiente equilibrado que todo cidadão brasileiro tem:

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.”

Segundo dados recentes, divulgados pela Comissão Europeia (2022) no relatório *Dialogues European Union - Brazil*, as Soluções Baseadas na Natureza (SBN) são inovações desenvolvidas para incluir a natureza nos mecanismos de resolução dos desafios contemporâneos, inserindo componentes e sistemas que restabeleçam, conectem e mantenham processos naturais nas cidades e em outras paisagens, somando esforços para garantir um ambiente equilibrado.

As SBNs em suas diferentes dimensões, são inspiradas e mantidas pela própria natureza, apresentando grande arcabouço de custo-efetividade por serem multifuncionais, oferecendo inúmeros serviços ecossistêmicos ao recuperarem ecossistemas degradados e regenerarem funções essenciais para a manutenção e resiliência do sistema urbano. Elas garantem acesso, de todos, ao meio ambiente equilibrado e indispensável a essencial e sadia qualidade de vida da coletividade para a presente e as futuras gerações (COMISSÃO EUROPEIA, 2022).

As discussões sobre desenvolvimento sustentável foram incluídas na pauta da Organização das Nações Unidas (ONU) em 1972, na Conferência das Nações Unidas

sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano realizada em Estocolmo, Suécia. Desde então, várias iniciativas relacionadas ao tema, na perspectiva da construção de acordos e agendas globais, marcaram o percurso do debate entre as nações. Entre estas, destacam-se a Rio+20 e a Agenda dos Objetivos do Desenvolvimento do Milênio (ODM), lançadas em 2000 e finalizadas em 2015. Ainda em 2015, foi iniciada uma nova agenda global, desta vez denominada Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, adotada por 193 estados membros da ONU.

A agenda 2030 trata-se de um plano de ação global, que abrange as dimensões ambiental, econômica e social do desenvolvimento sustentável, de forma integrada e inter-relacionada. Nesse plano estão incluídos os ODS, compostos por 17 objetivos e 169 metas de ação global para alcance até 2030 (ONU, 2018).

Guiados pelas metas globais evidencia-se que, para além do alcance das metas pactuadas, os países definam as suas metas nacionais e as incorporem em suas políticas, programas e planos de governo. Dessa maneira pretende-se movimentar a Agenda 2030 no território nacional por meio de eventos, programas, projetos, atividades e mecanismos de incentivo ao cumprimento dos ODS. Prêmios, plataformas de agregação de dados e observatórios são algumas das iniciativas encontradas no cenário nacional. O Prêmio ODS Brasil (2018) e o Prêmio ODS do Sesi (2018), são exemplos de iniciativas que incentivam as boas práticas de implementação da Agenda 2030 (ONU, 2018).

A problemática ambiental é uma das principais preocupações mundiais, passando pela sociedade, setor público e privado. Diante dos problemas de ordem ambiental encontrados pela sociedade contemporânea, os relacionados a área de saneamento básico, especialmente a ausência de tratamento dos esgotos domésticos, são determinantes para que as pessoas tenham qualidade de vida. Os investimentos em engenharia e tecnologia ambiental tem apontado algumas SBN que auxiliam na consolidação dos ODS, bem como, cumprimento de metas da Agenda 2030.

Alguns dos principais desafios do século XXI são a escassez de água, o esgotamento das águas subterrâneas, a poluição dos recursos hídricos, as mudanças climáticas e a gestão de águas (ESLZEIN, 2016). A falta de sistemas e instalações adequadas de tratamento de esgotos domésticos aumenta os impactos da escassez de água e, também, dos indicadores de qualidade (GHATANI e KHAWAS, 202).

De acordo com o último censo divulgado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o Brasil conta com uma população estimada em 211 milhões de habitantes distribuídos por 5570 municípios, dos quais 2211 não apresentam sistema de

rede coletora de esgotos domésticos. Nos demais 3359 municípios onde existe rede coletora, são tratados aproximadamente 11.000.000m<sup>3</sup>/d, dos quais passam por tratamento: preliminar (3%); primário (6%); secundário (69%) e terciário (22%).

Os sistemas híbridos de tratamento descentralizados, que combinam sistemas anaeróbios somados aos *Wetlands* Construídos (CWs), estão se fortalecendo cada vez mais enquanto alternativa interessante do ponto de vista ambiental, social e econômico, podendo ser dimensionados para atender residências (uni ou multifamiliar), promovendo saneamento básico para condomínios, bairros e localidades rurais afastadas dos centros urbanos (VON SPERLING e SEZERINO, 2018).

Segundo Price (1997) a tecnologia de CWs pode ser utilizada para resolver problemas na gestão de águas residuais sendo chamada de tecnologia verde devido ao uso de vegetação e de sua baixa demanda energética (muitas vezes os sistemas funcionam sem nenhum consumo de energia). Os CWs criam um ambiente semelhante aos banhados naturais, promovendo a biodiversidade sendo considerados ambientalmente sustentáveis.

O principal objetivo da utilização de sistemas de CWs, é a melhoria da qualidade da água, seguido por objetivos secundários, tais como: produção fotossintética; produção de energia; educação ambiental; harmonia paisagística; aplicação de conceitos de *ecodesign*, etc. (KADLEC e KNIGHT, 1999; ZHAO et al., 2019).

Historicamente o ser humano vem utilizando CWs no tratamento de águas residuárias (esgotos domésticos, águas de rio, efluente industrial, etc.). No mundo, o primeiro estudo registrado sobre a construção de *Wetlands* para tratamento de águas domiciliares originou-se na Alemanha no *Max Planck Institute* pela cientista Kathe Seidel, fazendo testes detalhados sobre diversas plantas aquáticas para garantir sua habilidade de absorção de poluentes químicos. Em 1953, seus estudos comprovaram que algumas espécies de plantas tinham a capacidade de remover fenol bactérias patogênicas e outros poluentes, além de crescerem em águas residuais apresentando uma variação fisiológica e morfológica (JIANG e CHUI, 2022).

No Brasil a primeira tentativa registrada de utilização de sistemas de CWs para purificação de águas foi feita por Salati e Rodrigues (1982), com a construção de um lago artificial nas proximidades de um rio (Rio Piracicamirim) altamente poluído localizado em Piracicaba estado de São Paulo. Outros trabalhos, com utilização de sistemas de CWs vem sendo desenvolvidos no Brasil desde então. Na década de 1990 cabe ressaltar os trabalhos desenvolvidos e publicados por: ROQUETE PINTO (1998) do Instituto Nacional de Tecnologia, VALENTIN e ROUSTON (1998) da Universidade de

Campinas, GIOVANINI e MARQUES (1998) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e PHILIPPI (1998) da Universidade Federal de Santa Catarina. Nos anos 2000 houve acréscimo acentuado no número de publicações na área envolvendo WC com grande destaque para as publicações de: SEZERINO (2006) da Universidade Federal de Santa Catarina e VON SPERLING e SEZERINO (2018) do grupo de pesquisa *Wetlands* Brasil, material esse, contendo diretrizes para o dimensionamento de CWs no Brasil.

Seguindo tendências recentes, a utilização de CWs é um modelo claro de aplicação extensiva as SBN, permitindo a recuperação de nutrientes e condicionando o esgoto tratado para o reuso em atividades como, por exemplo, vasos de descarga (urbanos ou industriais) e fertirrigação (florestais e agrícolas). Dessa maneira, os CWs são uma SBN consolidada que auxilia no cumprimento dos ODS aplicando tecnologia ambiental em escala real a serviço da qualidade de vida dessa e das futuras gerações, estando extremamente aliado aos objetivos da Agenda 2030.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O escopo principal do projeto de tese foi: dimensionar, instalar, iniciar a operação e monitorar o desempenho ambiental de um sistema sanitário híbrido (caixas de gordura/gradeamento + reator e filtro anaeróbio + CWs), gerado em unidade residencial unifamiliar.

### **2.2 Objetivos específicos**

Em paralelo ao objetivo geral tem-se enquanto objetivos específicos:

- a) Detalhar aspectos construtivos da instalação de um sistema sanitário híbrido descentralizado, incluindo Inventário de Ciclo de Vida (ICV) para Análise de Ciclo de Vida (ACV), pegada hídrica e de carbono;
- b) Detalhar aspectos de inserção das plantas, operação e manutenção de um sistema sanitário híbrido descentralizado;
- c) Realizar, através das análises de parâmetros físicos/físico-químicos, químicos e biológicos (incluindo os necessários para CONSEMA nº 419/2020, bem como, ecotoxicidade, genotoxicidade) a avaliação da performance ambiental de um sistema sanitário híbrido descentralizado nos termos da legislação vigente (CONAMA nº 357/2005 e 430/2011 e CONSEMA nº 355/2017); e
- d) Apontar possíveis reusos em função da qualidade apresentada (resolução CONSEMA nº 419/2020).

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 Problemática ambiental**

As referências relativas ao gerenciamento do esgoto ao longo da história remontam a Roma Antiga, sendo considerada sua Cloaca Máxima - construída no século VI a.C. - como o primeiro sistema de coleta de esgoto planejado e implantado no mundo. Essa estrutura fora projetada para receber parte dos esgotos domésticos das áreas adjacentes do centro urbano, propiciando a drenagem superficial da área, o que demonstrou essencial para o controle da malária (TSUTIYA e SOBRINHO, 1999).

Os dejetos humanos podem ser veículos transmissores de patógenos de várias doenças, entre as quais febre tifoide e paratifoide, diarreias infecciosas, amebíase, ancilostomíase, esquistossomose, teníase, ascaridíase, etc. Por isso, torna-se indispensável afastar as possibilidades de seu contato com o homem, as águas de abastecimentos, vetores (moscas, baratas, animais) e alimentos (FUNASA, 2020).

As principais fontes geradoras de esgotos sanitários, em uma comunidade urbana são basicamente, as edificações existentes nas áreas residenciais e comerciais e as instalações de sanitários, cozinhas e refeitórios existentes em instalações industriais. Para áreas residências é prática comum tomar-se como quantidade de esgotos sanitários gerados 80% da quantidade da água distribuída para o abastecimento doméstico. Desde então muito se avançou no quesito engenharia e tecnologia para levar saneamento básico até as populações locais e promover o desenvolvimento sustentável, mas o inventário das quantidades e fatores de carga pode ser melhorado quando se trata de unidades de tratamento de esgoto uni ou plurifamiliares (DUBOIS, et al., 2022).

#### **3.2 Esgoto doméstico: caracterização geral**

O esgoto é o termo usado para caracterizar os despejos provenientes dos diversos usos da água, como o doméstico, comercial, industrial, agrícola, em estabelecimentos públicos e outros. Perante a Norma Brasileira - NBR nº 7229/1997, esgoto doméstico é a água residuária gerada no conjunto de atividades de higiene pessoal, limpeza das residências, lavagem de roupas, preparo de alimentos e demais utilidades necessárias a rotina diária de uma moradia (BRAGA ET AL., 2005; PISHGAR et al., 2021). Apesar de variarem em função de costumes e condições socioeconômicas das populações, os

esgotos domésticos têm características bem definidas. Resultantes do uso da água pelo homem em função dos seus hábitos higiênicos e de suas necessidades fisiológicas, os esgotos domésticos compõem-se basicamente das águas de urina, fezes, restos de comida, sabões, detergentes e águas de lavagem (BOUTIM e EMME, 2016).

Águas cinzas são geradas nas pias, tanques e chuveiros, ou seja, excluem-se as águas fecais (fezes e urinas) oriundas da descarga de vasos sanitários e as águas de lavagens oriundas de lavagem de roupas. As águas negras são as geradas exclusivamente nos vasos sanitários das residências. As águas de lavagens são geradas nas etapas de lavagem de roupas (máquina de lavar, tanques, ralos) (VON SPERLING e SEZERINO, 2018). Frequentemente, os esgotos sanitários recebem contribuições irregulares, de origem industrial, que muito contribui para determinar suas características (GONÇALVES e SOUZA, 1997; OLIVER, DUBOIS E BOUTIN, 2019). Estas principais características normalmente são parâmetros gerais subdivididos em métodos físicos (cor, sólidos e temperaturas), físico-químicos (pH, concentração micelar crítica, isotermas de adsorção), químicos (DQO, COT, substâncias orgânicas e inorgânicas específicas) e biológicos (DBO<sub>5</sub>, biodegradabilidade, ecotoxicidade, genotoxicidade) (LIM, et al., 2022).

As principais características físicas ligadas aos esgotos domésticos são: matéria sólida (representando pequena fração da suspensão coloidal), temperatura (a do esgoto é um pouco superior à da água em função das taxas de reações apresentadas), propriedades organolépticas específicas (odor forte de origem anaeróbia em sua grande maioria, cor e turbidez características). Por último, em relação as constantes físicas do esgoto, cabe salientar que, a variação de vazão do esgoto doméstico ocorre em função de fatores diversos como poder aquisitivo, costumes e cultura dos habitantes de determinado local (FUNASA, 2020).

As principais características químicas dos esgotos domésticos são: matéria inorgânica (nos esgotos é formada principalmente pela presença de areia e de substâncias minerais em solução) e matéria orgânica. As parcelas sólidas presentes no esgoto são, em sua grande maioria, de origem orgânica, apresentando predominantemente combinações de carbono (hidrogênio (H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>, OH, DBO<sub>5,20</sub>, DQO), fósforo (PO<sub>4</sub>) e nitrogênio (NH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>)). Ainda conforme expõe FUNASA, 2020:

A introdução de matéria orgânica em um corpo d'água resulta indiretamente no consumo de oxigênio dissolvido e tem sido utilizado tradicionalmente para a determinação do grau de poluição e de autodepuração em cursos d'água. Em relação as

características biológicas apresentadas pelo esgoto doméstico destacam-se os microorganismos de águas residuais como, por exemplo, os fungos, os protozoários, os vírus e as algas. A esse grupo e não menos importante somam-se as bactérias que são responsáveis pela decomposição e estabilização da matéria orgânica, tanto na natureza como nas estações de tratamento, especialmente com sistemas das SBNs, como os *Wetlands* Construídos (VON SPERLING, 1996; WANG et al., 2022).

Além do mais, a ausência ou presença desses organismos num corpo d'água, indica formas diferentes de poluição. Para referência da poluição de origem humana, costuma-se adotar os organismos do grupo coliforme (termotolerantes e totais), pois são típicas do intestino do homem e de outros animais de sangue quente (mamíferos) por estarem presentes nas fezes humanas e, por serem de simples determinação, são utilizadas como referência para indicar e medir a grandeza da poluição (FUNASA, 2020; SOME et al., 2021).

Para gestão e gerenciamento sustentável das águas residuárias podem ser considerados conceitos mais tradicionais (GONÇALVES e SOUZA, 1997; KOUL et al., 2022). No primeiro caso, a composição típica dos esgotos domésticos sanitários pode ser classificada quanto as suas concentrações em fraco, médio e forte, segundo indicado na Tabela 1, direcionando a configuração de sistema de tratamento que poderá ser utilizada. No segundo caso, o tipo de efluente e sua concentração, grau de heterogeneidade e a viabilidade da técnica de tratamento e sua eficiência, praticabilidade, dificuldades operacionais, impacto ambiental e custos de tratamento são todos fatores que devem ser considerados na escolha de uma técnica de tratamento de águas residuais domésticas.

**Tabela 1.** Constituintes e concentrações nos esgotos (fortes, médios e fracos).

| CONSTITUINTES           | CONCENTRAÇÕES |       |       |
|-------------------------|---------------|-------|-------|
|                         | Forte         | Média | Fraca |
| 1 Sólidos totais        | 1200          | 720   | 350   |
| 1.1 Dissolvidos totais  | 850           | 500   | 250   |
| 1.1.1 Fixos             | 525           | 300   | 145   |
| 1.1.2 Voláteis          | 325           | 200   | 105   |
| 1.2 Suspensos totais    | 350           | 220   | 100   |
| 1.2.1 Fixos             | 75            | 55    | 20    |
| 1.2.2 Voláteis          | 275           | 165   | 80    |
| 2 Sólidos sedimentáveis | 20            | 10    | 5     |
| 3 DBO <sub>5,20</sub>   | 400           | 220   | 110   |
| 4 COT                   | 260           | 160   | 80    |
| 5 DQO                   | 1000          | 500   | 250   |
| 6 Nitrogênio total      | 85            | 40    | 20    |

|                  |     |     |    |
|------------------|-----|-----|----|
| 6.1 Orgânico     | 35  | 15  | 8  |
| 6.2 Amônia livre | 50  | 25  | 12 |
| 6.3 Nitritos     | 0   | 0   | 0  |
| 6.4 Nitratos     | 0   | 0   | 0  |
| 7 Fósforo total  | 15  | 8   | 4  |
| 7.1 Orgânico     | 5   | 3   | 1  |
| 7.2 Inorgânico   | 10  | 5   | 3  |
| 8 Cloretos       | 100 | 50  | 30 |
| 9 Alcalinidade   | 150 | 100 | 50 |
| 10 Graxa         | 150 | 100 | 50 |

Fonte: GONÇALVES e SOUZA, 1997.

A configuração da ETE deverá atender principalmente ao controle dos parâmetros mais críticos de impactos dos efluentes. E, em conjunto com maior detalhamento, vai ocorrendo com o controle de contaminantes emergentes: Disruptores Endócrinos (DEs), produtos farmacêuticos, hormônios e toxinas, bem como corantes sintéticos (KHAN, et al., 2022).

A disposição não controlada de esgotos no solo pode ser causa de doenças, adquiridas pelo contato das mãos, dos pés ou de outras partes do corpo com o terreno contaminado. Ademais, esgotos dispostos inapropriadamente no solo podem causar a contaminação da água subterrânea, ou escoar sobre o terreno, contaminando os corpos de água superficiais (FUNASA, 2020).

É grande o número de doenças cujo controle está relacionado com o destino inadequado dos dejetos humanos sem prévio tratamento. Na Tabela 2, cita-se as principais doenças, o agente patogênico responsável, as formas mais comuns de transmissão, bem como, as medidas de proteção que, eventualmente, podem vir a ser adotadas no combate a essas moléstias (BARROS, 1995; WANG, ZHU E MAO, 2022).

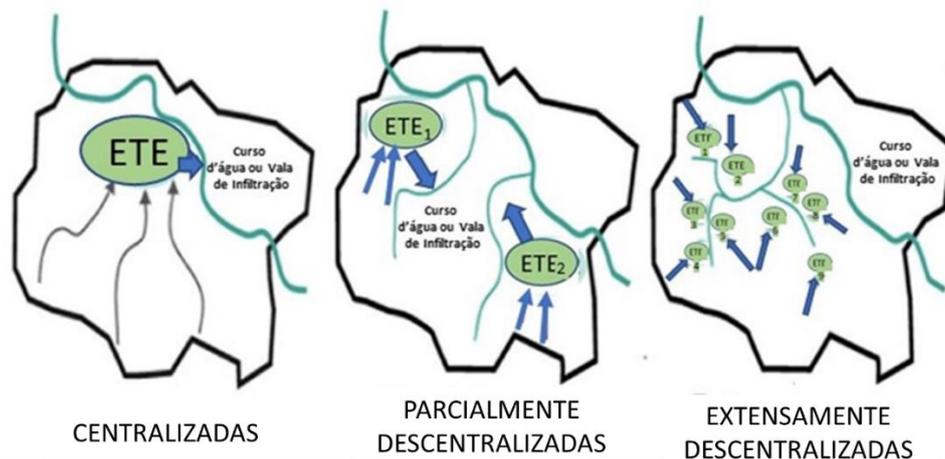
**Tabela 2.** Principais organismos causadores de doenças.

| Organismos causadores | Principais agentes etiológicos   | Transmissão                               | Medidas de prevenção/Processos                        |
|-----------------------|--|---|---|
| Bactérias             | <i>Salmonella typhi</i> e<br><i>paratyphi</i> , <i>Vibrio cholerae</i> e<br><i>Yersinia enterocolitica</i> | Fecal-oral na<br>água                     | Água tratada<br>Desinfecção                           |
| Vírus                 | Vírus da hepatite e<br>poliomielite e rotavírus  | Fecal-oral na<br>água                     | Imunização (vacinas) e<br>água tratada                |
| Protozoário           | <i>Giardia lamblia</i> e<br><i>Toxoplasma gondi</i>  | Fecal-oral na<br>água                     | Água tratada  |
| Helmintos             | <i>Ascaris lumbricoides</i> ,<br><i>Schistosoma duodenale</i> e<br><i>Taenia (solium e saginata)</i>       | Ingestão de<br>alimentos<br>contaminados. | Esgotamento sanitário e<br>higienização dos alimentos |

A disposição adequada dos esgotos é essencial para a proteção da saúde pública pois muitas infecções podem ser transmitidas de uma pessoa doente para outra sadia por diferentes caminhos, envolvendo as excreções humanas. Os esgotos podem contaminar a água, os alimentos, os utensílios domésticos, as mãos, o solo ou serem transportados por vetores, como moscas e baratas, provocando novas infecções. Dessa maneira, outra importante razão para gerenciar corretamente os esgotos é a preservação do meio ambiente sendo que, o seu tratamento, é indispensável a manutenção da qualidade de vida e ambiental (BRAGA, 2005).

### **3.3 Unidades de Saneamento Descentralizadas a Extensamente Descentralizadas**

Sistemas de tratamento de esgotos descentralizados são adequados para comunidades em áreas remotas, indústrias, hotéis e residências em áreas rurais e são considerados para comunidades de até 5.000 habitantes. Para mais de 5.000 habitantes, sistemas centralizados de coleta e tratamento de águas residuais são mais apropriados. Unidades de tratamento de águas residuárias centralizadas não são viáveis em áreas rurais onde as comunidades estão dispersas. Portanto, adotar o tratamento descentralizado de águas residuais tem um grande potencial para proteger os recursos do solo e do sistema hidrológico (águas superficiais e subterrâneas). Diferentes modelos de descentralização (ETEs com tanques sépticos, biofiltros, *Wetlands* Construídos, lagoas de estabilização, sistema sequencial em batelada, valas de infiltração) podem ser vistos na Figura 1, conforme classificação de Mizzouri, Kochary e Barwari, 2022.



**Figura 1.** Sistemas de saneamento para comunidades de até 5000 habitantes.

Além das configurações citadas na Figura 1, Ferreira, Santos e Imteaz (2023) consideram os indicadores operacionais: 1) *Desempenho do sistema* - o volume médio de água não potável consumida ( $m^3$ /ano) é calculado, bem como o volume de água da chuva captada e água cinza reutilizado ( $m^3$ /ano). O volume médio de água potável inserido no sistema ( $m^3$ /ano) é também determinado. A partir desses valores, a eficácia do sistema é obtida dividindo-se o volume de água não potável utilizada (água pluvial e cinza) e o volume de água não potável necessária para os usos finais considerados; 2) *Estudo Econômico* - a SAPRA (SAPRA - Aproveitamento de água da chuva e sistemas de reutilização de águas cinzas em edifícios, foi desenvolvido por Santos (2012) usando Microsoft Office Excel 2007 e programado em Microsoft Visual Basic for Applications - VBA) também realiza uma análise econômica, calculando o período de retorno estimado, obtido pela relação entre os custos (instalação inicial e manutenção) e o custo anual poupança. Na estimativa dos custos de investimento, são considerados todos os custos envolvidos na execução do projeto. O custo de manutenção é estimado atribuindo uma porcentagem de manutenção em relação ao custo de investimento. A economia anual estimada resulta da soma da economia média de cada mês, que é obtida pela redução do consumo de água potável em relação ao sistema convencional. A economia mensal é calculada pela diferença de custos de consumo de água do edifício sem e com o sistema híbrido, de acordo às taxas do município em estudo.

No comparativo dos sistemas para saneamento descentralizados aparecem os *Wetlands* Construídos em diferentes configurações (MASOUD, ALFARRA e SORLINI, 2022), promovendo saneamento descentralizado na filosofia de economia circular, demonstrando evidências quantitativas de remoção de poluentes mais eficientes quando

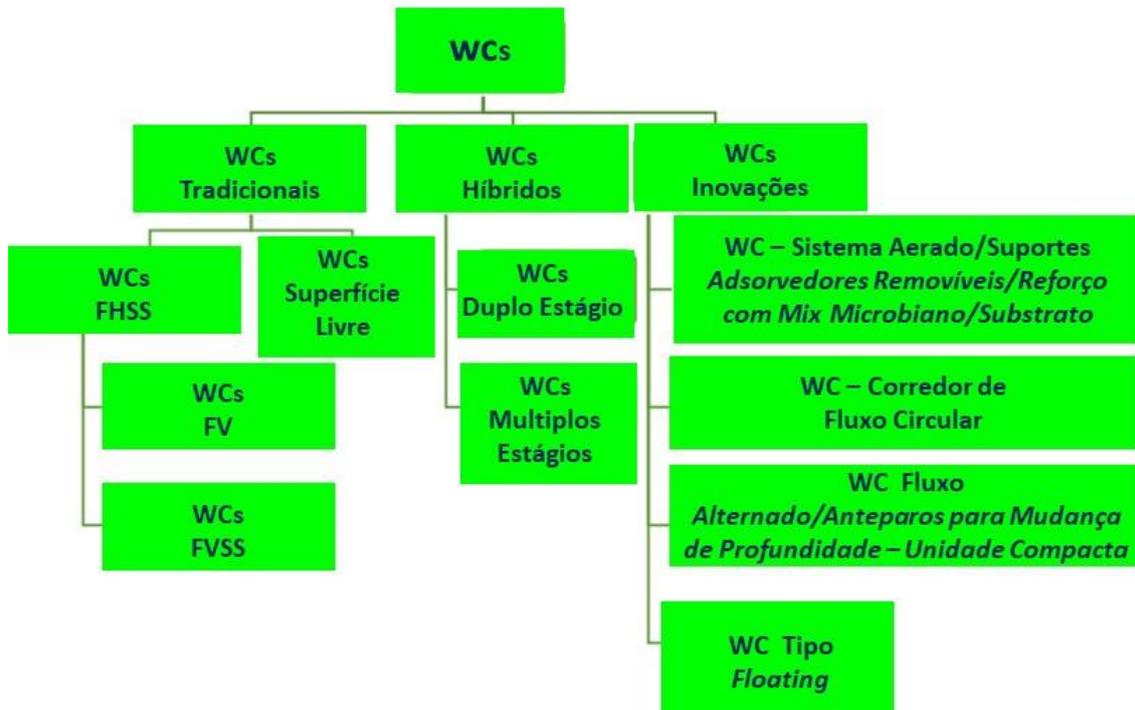
combinados com anaerobiose (DEL CASTILLO et al., 2022). O baixo custo de construção, baixos requisitos operacionais e de manutenção, consumo mínimo de energia, ocupação reduzida do solo e baixa emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) sustentam conclusão de que os sistemas combinados RA + CWs são uma tecnologia eficaz, robusta, flexível e altamente sustentável para tratamento descentralizado de águas residuais, especialmente para países em desenvolvimento com recursos e infraestrutura limitados.

### 3.4 *Wetlands* Construídos (CWs)

OS CWs também denominados de “alagados construídos”, “banhados construídos” ou “jardins filtrantes”, podem ser definidos como sistemas de engenharia projetados e construídos para utilizar processos naturais envolvidos com vegetação de banhados, solos, e as comunidades microbianas presentes para auxiliar no tratamento de águas residuárias de forma controlada e visando potencializar os mecanismos naturais de remoção de poluentes disponíveis. Esses sistemas podem ser classificados (Figura 2) considerando diferentes aspectos de construção e operação (VYMAZAL, 2010; COLARES et al., 2023).

Dentro das tecnologias de tratamento terciário existentes, aponta-se os CWs como alternativa consolidada em diversos locais do país (publicações *Wetlands* Brasil), da América (*Red Panamericana de Sistemas de Humedales – HUPANAM*) e do mundo (*International Water Association – IWA, Specialist Group Wetland Systems for Water Pollution Control*).

Sabe-se ainda, que na literatura nacional há outras expressões, com destaque para “sistemas alagados construídos”, além de diversas alternativas, tais como “terras úmidas construídas”, “leitos plantados”, “leitos com macrófitas”, “filtros plantados com macrófitas”, “filtros com o macrófitas”, “leitos cultivados”, “sistemas de zonas de raízes”, terras úmidas artificiais, terras úmidas construídas, áreas alagadas construídas, leitos cultivados com macrófitas, fitolagunagem e solo-planta. Na Europa, os CWs, de modo geral, são conhecidos como “*Reed Bed Treatment System*” e, nos Estados Unidos podem aparecer citações como “*Vegetated submerged bed*” fazendo referência a tecnologia ambiental de CWs. Admite-se, em âmbito internacional, que os termos mais utilizados para se referir a tecnologia de CWs em inglês são “*root zone*”, “*reed beds*”, “*constructed Wetlands*” e “*treatment Wetlands*” (VON SPERLING e SEZERINO, 2018).



**Figura 2.** Configurações possíveis de CWs.

Os CWs são sistemas projetados para utilizar macrófitas plantadas sobre substratos específicos, como areia, cascalhos ou outro material inerte, nos quais ocorre a formação de biofilmes que agregam populações variadas de microrganismos (SOUSA, 2004; KUMAR et al., 2023).

Estes sistemas podem ser utilizados para tratamento de esgotos domésticos, efluentes de variadas indústrias e da agropecuária, águas contaminadas (DIAS, 2000) e drenagem ácida de minas (JAGE e ZIPPER, 2001; PAT-ESPADAS, et al., 2018), utilizando o princípio de solo úmido cultivado, onde o solo e a zona de raízes das plantas são responsáveis pela despoluição das águas residuárias e podem desempenhar algumas funções semelhantes ao tratamento convencional ou completo dos esgotos domésticos, por meio de processos físicos, químicos e biológicos (SILVA, 2007; SHUKLA et al., 2022).

### 3.5 Diretrizes para reuso da água, do lodo e das plantas de sistemas de saneamento

Sistemas locais descentralizados de tratamento de esgotos promovem o tratamento de esgotos domésticos onde as distâncias entre as fontes geradoras e o seu tratamento e disposição final são próximas entre si, não necessitando normalmente de rede coletora

extensa, coletor-tronco, poços de visita, emissários, elevatórias etc. O desafio envolvendo o tratamento de esgoto doméstico é adequar a água residuária a legislação vigente, permitindo sua utilização novamente.

Os problemas associados ao reuso para fins não potáveis são, principalmente, os custos elevados de sistemas duplos de distribuição, dificuldades operacionais e riscos potenciais de ocorrência de conexões cruzadas. Os custos, entretanto, devem ser considerados em relação aos benefícios de conservar água potável e de, eventualmente, adiar ou eliminar a necessidade de novos mananciais para abastecimento público (BRAGA, 2005; PARTYKA e BOND, 2022).

O reuso local de esgoto doméstico tratado é sua utilização para diversas finalidades, exceto para o consumo humano (NBR nº 13969/1997). Já o reuso para fins agrícolas e florestais é a aplicação de água de reuso para produção agrícola, cultivo de florestas plantadas e recuperação de áreas degradadas e o reuso para fins industriais é a utilização não potável de água de reuso em processos, atividades e operações industriais (CONSEMA nº 419/2020).

Há ainda, o reuso para fins urbanos, que é a utilização de água de reuso em áreas urbanas, industriais ou rurais, públicas ou privadas, para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros e veículos, desobstrução de tubulações, obras civis, equipamentos, instalações, entre outros usos não potáveis (CONSEMA nº 419/2020).

Sendo que, para fins urbanos, a resolução propõe as duas seguintes classificações,

- “I - Classe A: água de reuso destinada à irrigação paisagística em locais de acesso irrestrito, lavagem de logradouros públicos e lavagem de veículos;
- II - Classe B: água de reuso destinada à irrigação paisagística em locais de acesso limitado ou restrito, ao abatimento de poeira, aos usos na construção civil e em estações de tratamento de efluente e à desobstrução de redes de esgoto pluvial e/ou cloacal”

Para isso, deve atender aos padrões de qualidade expostos na Tabela 3.

**Tabela 3.** Padrões de qualidade da água de reuso para fins urbanos.

| Parâmetros                 | Classe A         | Classe B        |
|----------------------------|------------------|-----------------|
| Coliformes Termotolerantes | < 200 NMP/100 mL | < 10 NMP/100 mL |
| Ovos de helmintos          | < 1 ovo/L        | -               |
| Cloro Residual Total       |                  | < 1 mgL         |
| Condutividade elétrica     |                  | < 3 dS/m        |

Diversos países da Europa, assim como os países industrializados da Ásia localizados em regiões de escassez de água, exercem, extensivamente, a prática de reuso urbano não potável. Entre eles, o Japão vem utilizando efluentes secundários para diversas finalidades. Em Fukuoka, uma cidade com aproximadamente 1,2 milhão de habitantes, situada no sudoeste do país, diversos setores operam com rede dupla de distribuição de água, uma das quais com esgotos domésticos tratados em nível terciário (lodos ativados, desinfecção com cloro, filtração, ozonização) para uso em descarga de banheiros em edifícios residenciais. Essa água residuária tratada é também utilizada para outros fins, incluindo irrigação de árvores em áreas urbanas, para lavagem de gases e alguns usos industriais, tais como resfriamento e desodorização. Diversas outras cidades do Japão, entre elas Oita, Aomori e Tóquio, fazem uso de esgotos tratados e águas de baixa qualidade para fins urbanos não potáveis, proporcionando uma economia significativa dos escassos recursos hídricos localmente disponíveis (BRAGA, 2005; TAKEUCHI e TANAKA, 2022).

Também é importante ressaltar que um sistema de tratamento avançado para o reuso potável pode levar a inviabilidade econômico-financeira do abastecimento público, não garantindo a manutenção da saúde do consumidor; sugerindo que a prática deste reuso poderá ser considerada, quando a operação dos sistemas de tratamento e de distribuição e de vigilância sanitária serem adequados, obedecer aos critérios como a utilização única de sistemas de reuso indireto, de barreiras múltiplas nos sistemas de tratamento, e de distribuição e de vigilância sanitária serem adequados, obedecer aos critérios como a utilização única de sistemas de reuso indireto, de barreiras múltiplas nos sistemas de tratamento (HESPANHOL, 1999; DATE et al., 2022).

As plantas macrófitas exercem um papel importante para a depuração dos efluentes, sendo estas responsáveis por retirar diversas substâncias das águas poluídas e são necessárias para os sistemas de CWs. Porém, ao final do ciclo de desenvolvimento elas “secam” e precisam ser removidas evitando o fenômeno de desorção de nutrientes no sistema. Como alternativa ao manejo, pode-se destinar os restos de podas das plantas macrófitas para atuarem como produtor primário de alimento para peixes, aves e mamíferos e ainda fornecendo materiais de importância econômica para a sociedade; como alimentos para o homem, fertilizantes (solo, tanques, piscicultura) matéria prima para fabricação de remédios, utensílios domésticos, artesanatos, tijolos para a construção de casa, dentre outros (DEAN, et al., 2022).

Em relação ao manejo do lodo, a NBR nº 7229 prevê remoção do lodo para leito de secagem ou destinação para a estação de tratamento de esgotos urbanos. Existem estudos que visam o reaproveitamento do lodo enquanto matéria prima para compostagem ou como material agregado em peças cerâmicas.

### **3.6 Legislação ambiental pertinente**

O desenvolvimento do trabalho de tese fundamenta-se na legislação e normatização brasileira existente para esgotos domésticos, cita-se aqui nesse capítulo as mais relevantes e referenciadas no trabalho:

#### **3.6.1 Resoluções federais e estaduais**

Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357/2005 de 17 de março de 2005: dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes em território nacional, e dá outras providências.

Resolução CONAMA nº 430/2011: dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a resolução CONAMA nº 357/2005.

Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul (CONSEMA) nº 128/2006: dispõe sobre a fixação de padrões de emissão de efluentes líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul.

Resolução CONSEMA nº 355 de 2017: atualiza a resolução CONSEMA nº 128/2006 e dispõe sobre os 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.

Resolução CONSEMA nº 334/2016: revoga a resolução CONSEMA nº 129/2006 e dispõe sobre critérios e padrões de emissão para toxicidade de efluentes líquidos lançados em águas superficiais do Estado do Rio Grande do Sul.

Resolução CONSEMA nº 419/2020: estabelece critérios e procedimentos para a utilização de água de reuso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul.

Resolução CONSEMA nº 245/2010: dispõe sobre a fixação de procedimentos para o licenciamento de sistemas de esgotamento sanitário, considerando etapas de eficiência, a fim de alcançar progressivamente os padrões de emissão e os padrões das classes dos corpos hídricos receptores, em conformidade com os planos de saneamento e de recursos hídricos.

### **3.6.2 Normas brasileiras ordinárias**

NBR nº 8160/1999: sistemas prediais de esgoto sanitário - projeto e execução – esta norma estabelece as exigências e recomendações relativas ao projeto, execução, ensaio e manutenção dos sistemas prediais de esgoto sanitário, para atenderem às exigências mínimas quanto à higiene, segurança e conforto dos usuários, tendo em vista a qualidade destes sistemas.

NBR nº 7229/1997: projeto, construção e operação de - sistemas de tanques sépticos – esta norma fixa as condições exigíveis para projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos, incluindo tratamento e disposição de efluentes lodo sedimentado. Tem por objetivo preservar a saúde pública e ambiental, a higiene, o conforto e a segurança dos habitantes de áreas servidas por estes sistemas.

NBR nº 13969/1997: tanques sépticos - unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos com detalhes de projeto, construção e operação – esta norma objetiva oferecer alternativas de procedimentos técnicos para o projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos de tanque séptico, dentro do sistema de tanque séptico para o tratamento local de esgotos. As alternativas aqui citadas devem ser selecionadas de acordo com as necessidades e condições locais onde é implantado o sistema de tratamento, não havendo restrições quanto à capacidade de tratamento das unidades. Conforme as necessidades locais, as alternativas citadas podem ser utilizadas complementarmente entre si, para atender ao maior rigor legal ou para efetiva proteção do manancial hídrico, a critério do órgão fiscalizador competente.

NBR nº 12209/1992: projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário – esta norma fixa as condições exigíveis para a elaboração de projeto hidráulico-sanitário de estações de tratamento de esgoto sanitário (ETE), observada a regulamentação específica

das entidades responsáveis pelo planejamento e desenvolvimento do sistema de esgoto sanitário.

NBR nº 9648/1986: estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário.

NBR nº 9897/1987: planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores.

NBR nº 9898/1987: preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores.

### **3.6.3 Diretrizes brasileiras extraordinárias**

Boletim extraordinário do grupo *Wetlands* Brasil: edição especial produzida pelo grupo de estudos em sistemas WC aplicados ao tratamento de águas residuárias versando sobre dimensionamento de WC construídos no Brasil – documento de consenso entre pesquisadores e praticantes – publicado por VON SPERLING e SEZERINO no ano de 2018. A elaboração do documento busca alcançar a consolidação por meio de um consenso entre os pesquisadores e praticantes da área de *Wetlands* (sistemas alagados construídos), fixando os principais critérios e parâmetros de projeto que podem ser utilizados para as três principais variantes do sistema: WCH (recebendo esgoto pré-tratado); WCV (recebendo esgoto pré-tratado) e WC de escoamento vertical (sistema francês) (recebendo esgoto bruto).

O boletim extraordinário conta com fórmulas e roteiro para simulação de dimensionamento, além de um exemplo simplificado para diretriz de cálculos. Possui também orientações diretas e objetivas quanto a aspectos construtivos: dimensões de tubos e suas perfurações, altura das camadas para o leito filtrante, granulometria do leito filtrante, densidade de espécies vegetais por metro quadrado recomendada (5 por metro quadrado), tipo de impermeabilização a ser adotado no solo, esquemas para montagem de sistema de distribuição e coleta do esgoto em bruto, em tratamento e tratado.

Afora isso, mais adiante, o material traz orientações gerais quanto a partida, operação e manutenção (preditiva, preventiva e corretiva) dos sistemas de CWs. Dentre os aspectos operacionais destaca-se a recomendação de instalação de registros para controle de direção do fluxo, projetar um sistema “by pass” em paralelo ao sistema permitindo isolamento e inspeção dos módulos de CWs bem como, a existência de gabaritos para controle da altura do leito saturado.

### **3.6.4 Políticas públicas e diretrizes gerais para saneamento**

Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6938 de 31 de agosto de 1981): dispõe sobre a política nacional do meio ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências;

Política Nacional de Saneamento Básico (Lei nº 11445 de 25 de janeiro de 2007): estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências, como por exemplo, criar o instrumento denominado Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) que consiste no planejamento integrado do saneamento básico considerando seus quatro componentes: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, coleta de lixo e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas, possuindo horizonte de 20 anos.

Política Estadual de Saneamento Básico (Lei nº12037 de 19 de dezembro de 2003): dispõe sobre a política estadual de saneamento e dá outras providências, como por exemplo, criar o instrumento denominado o Plano Estadual de Saneamento do Rio Grande do Sul (PLANESAN-RS), com foco na melhoria da salubridade ambiental de todo o estado. O trabalho de contempla a prestação de serviços de saneamento básico nos seus quatro eixos – abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo de águas pluviais urbanas- abrangendo as zonas urbanas e rurais dos 497 municípios do RS. Elaborado à luz do novo arco regulatório do saneamento básico, o PLANESAN-RS englobou o diagnóstico da situação; a fixação de objetivos e metas; a definição do conjunto de ações estratégicas para o cumprimento desses objetivos e a avaliação da viabilidade econômica, financeira, social e ambiental para a implantação dessas ações, em um prazo de 20 anos. O PLANESAN-RS está estruturado em três programas: 1 - Saneamento Estruturante; 2 - Saneamento Básico Integrado e 3 - Saneamento Rural. O resultado dos projetos e ações previstos será a universalização dos serviços, uso sustentável dos recursos naturais e melhoria da qualidade de vida da população.

Plano Municipal de Saneamento Básico do município de São Francisco de Paula: os serviços inserem-se no contexto da Lei nº 11.445/07 que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico. Os serviços também são balizados pelo decreto nº 7.217/2010, que regulamenta a referida

lei, bem como pelo Estatuto das Cidades (Lei nº 10.257/2001) que define o acesso aos serviços de saneamento básico como um dos componentes do direito à cidade.

Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental Integrado - PDDUAI do Município de São Francisco de Paula (Lei nº 3499/2019).

Código Estadual do Meio Ambiente (Lei nº 11520/2000 atualizada pela Lei nº 15434/2020): institui o código estadual do meio ambiente do Estado do Rio Grande do Sul.

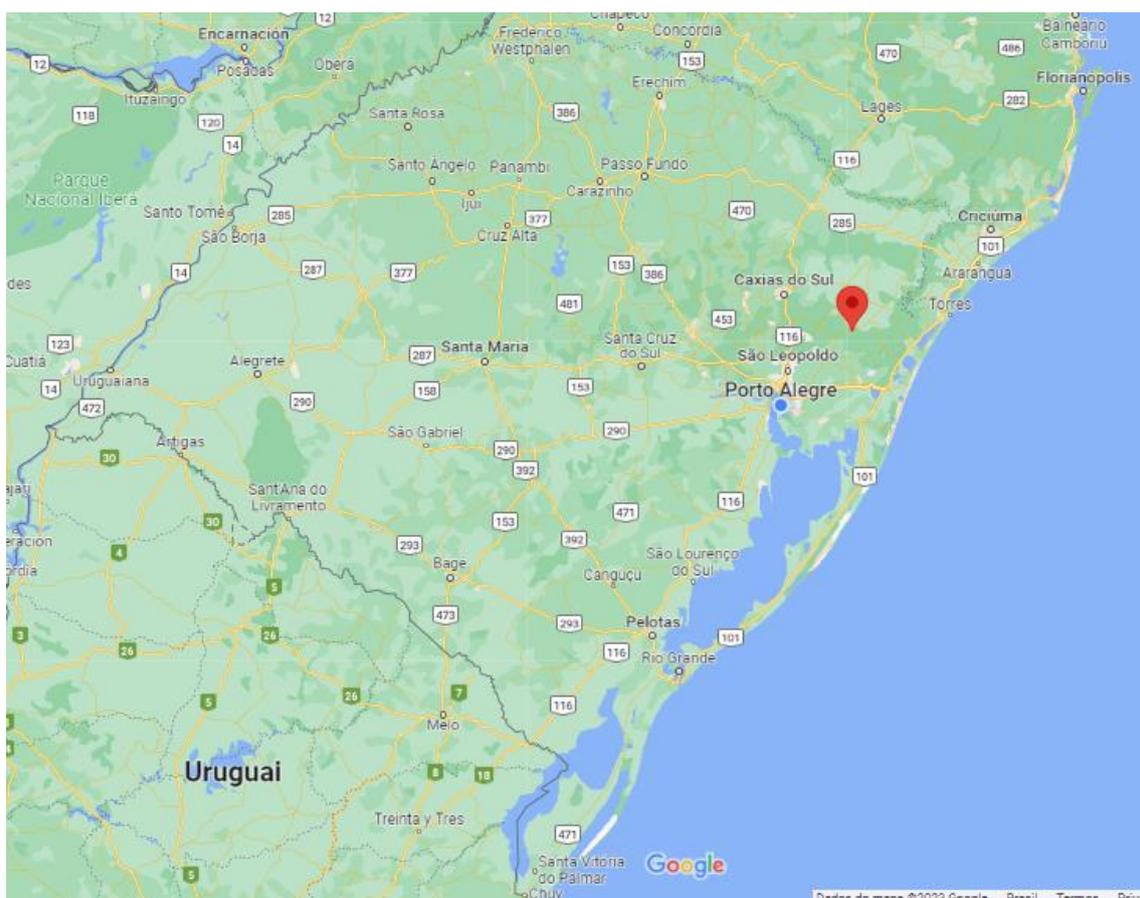
Manual de Saneamento da FUNASA (5ª Edição 2019, revisada e ampliada): reúne informações e diretrizes acerca do saneamento básico no Brasil.

Manual prático de análises laboratoriais em águas (FUNASA manual de bolso).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Localização e detalhamento da área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido em uma residência unifamiliar em área urbana do município de São Francisco de Paula (SFP), RS, Brasil, localizado na região nordeste do Rio Grande do Sul distante 112 quilômetros da capital Porto Alegre (Figura 3).

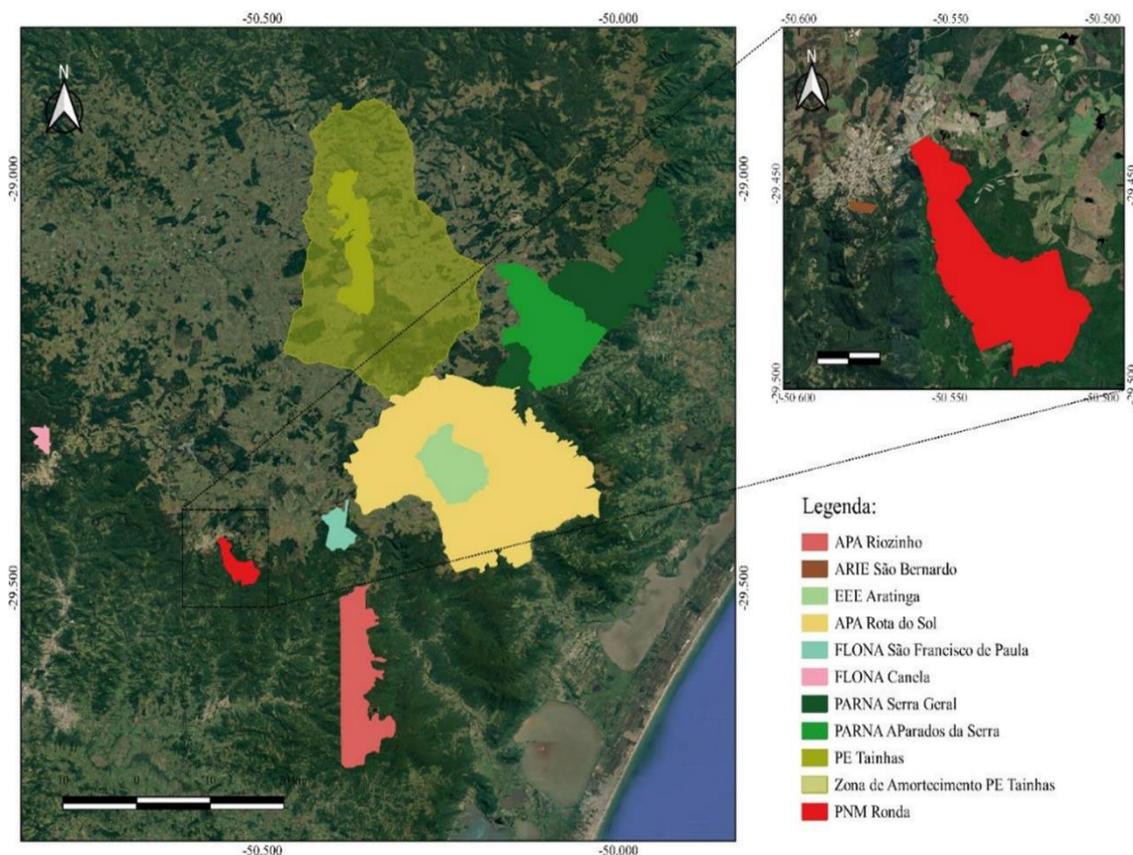


**Figura 3.** Indicação do município localizado na região nordeste do Rio Grande do Sul.

O município é o 15º em extensão territorial do Rio Grande Sul com área de 3.274,03 km<sup>2</sup> dos quais 190 km<sup>2</sup> são ocupados pelo perímetro urbano e 3.084,03 km<sup>2</sup> pela área rural. Devido a sua grande extensão em área, levar saneamento a todas localidades (urbanas e rurais) é desafio a ser vencido, o distrito de Cazuza Ferreira está a 85 km da sede e o de Pedra Lisa a 130 km, por exemplo. Em 2022, a população estimada era de 21.871 habitantes (IBGE, 2022). A altitude em SFP varia entre 800 e 1000 metros e o índice pluviométrico médio anual é de 1200mm. A temperatura média anual é de 15,3

°C e, de acordo com a classificação de Köppen, o clima é mesotérmico subtropical com períodos de temperado úmido e invernos frios e nevoeiros frequentes. O município contém parte de cinco bacias hidrográficas: do Taquari-Antas, do Rio Caí, do Sinos, do Tramandaí e do Mampituba, sendo a primeira predominante em termos de contribuição territorial e a do Sinos a mais densamente povoada.

No município encontra-se um mosaico de Unidade de Conservação (UCs) de diferentes categorias como o Parque Natural Municipal da Ronda, Parque Estadual do Tainhas, Parques Nacionais (Aparados da Serra e Serra Geral), Florestas Nacionais (SFP de Paula e Canela), Estação Ecológica de Aratinga e Área de Proteção Ambiental da Rota do Sol sendo as mais importantes delas (IBGE, 2022) (Figura 4).



**Figura 4.** UCs beneficiadas (direta ou indiretamente) pela área de influência do projeto.

A residência utilizada como objeto do projeto de tese está situada na Rua dos Manacás, nº 201, Bairro São Bernardo, Condomínio Serra Alta e encontra-se em zona urbana residencial limítrofe a zona rural do município (5km do centro comercial). O local é identificado, perante o cartório de registros e secretarias municipais, como condomínio urbano e possui acesso a água tratada pela Companhia Rio-grandense de Abastecimento



O condomínio não tem calçamento nas ruas e passeios (estradas e calçadas de chão batido), bem como, não dispõe de nenhum serviço de coleta, transporte e/ou tratamento de esgotos domésticos gerados nas residências edificadas. Atualmente todo território municipal (centro, bairros e aglomerações urbanas nos distritos rurais) é desprovido de sistema de coleta e tratamento de esgotos (Figura 6).



**Figura 6.** Residência unifamiliar objeto do estudo.

É exigido, para obtenção da carta de habite-se da residência, o dimensionamento de sistema individual de tratamento de esgoto doméstico com diretrizes gerais de dimensionamento, construção, operação e manutenção encontradas nas NBRs: 8160/1999, 7229/1993 e 13969/1997.

A residência em questão está assentada em lote urbano de 15m x 42m totalizando 630m<sup>2</sup>. A área onde o sistema sanitário está instalado respeita as diretrizes constantes no plano diretor de desenvolvimento urbano ambiental integrado do município, aprovado em 2019, para a área residencial em questão sendo elas: a) 1,5m de construções e limites de terrenos; e b) 3m de árvores e pontos da rede pública de água; e c) 15m de pontos de captação de água. Na área foram removidas algumas árvores (exóticas invasoras – *Pinnus spp*), o que modificou a área ampliando a taxa de radiação solar incidente sobre o sistema (Figura 7), melhorando as condições para desenvolvimento das plantas.



**Figura 7.** Remoção de árvores exóticas resultando em maior incidência solar na área.

A residência possui carta de habite-se sob número 2020/032 emitida pela Secretaria Municipal de Planejamento, Urbanismo, Habitação e Gestão, o que avaliza que o sistema sanitário foi fiscalizado e aprovado pelos profissionais competentes e, além disso, abre caminho para a multiplicação da implantação por soluções mais tecnológicas (do ponto de vista ambiental, econômico, social, político). Na ocasião, no ano de 2020, o sistema sanitário aprovado pela prefeitura para o local foi o Tanque de Evapotranspiração (TEVAP) conforme visualizado na (Figura 8). O TEVAP é uma tecnologia ambiental bastante interessante do ponto de vista econômico e ambiental, sendo um método alternativo ao tradicional sistema de tratamento individual preconizado pela normatização brasileira (fossa-filtro-sumidouro).

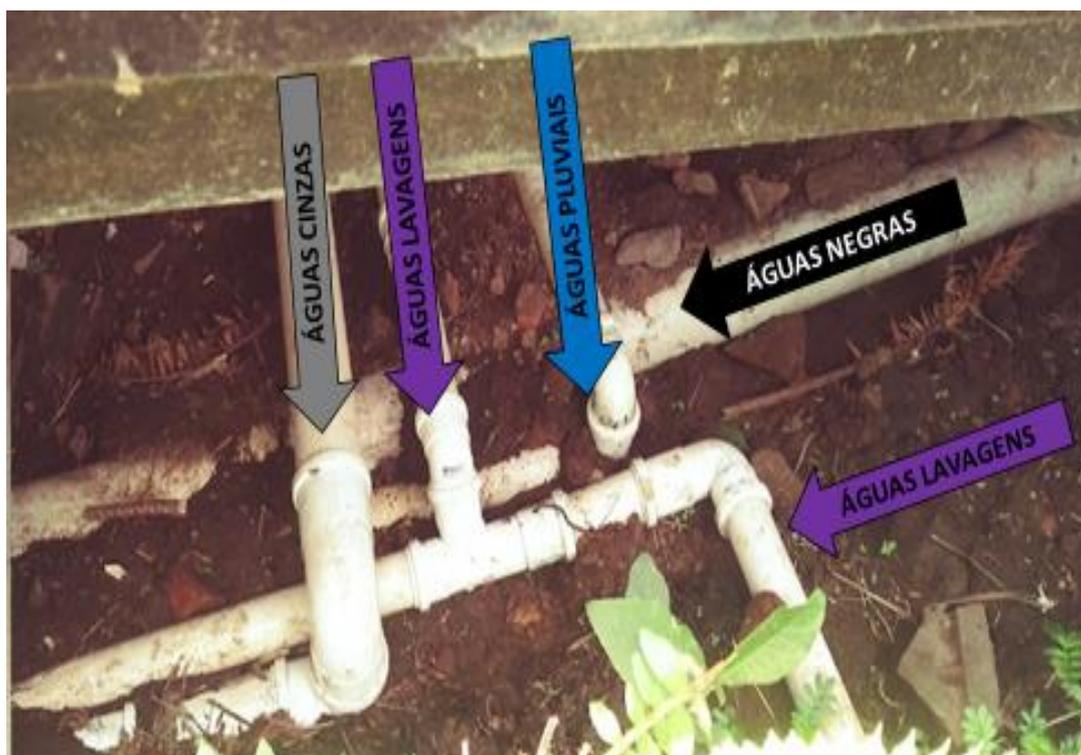


**Figura 8.** Sistema sanitário (TEVAP) utilizado na residência entre 2017 e 2022.

Esse TEVAP operou entre os anos de 2017 e 2021, suportando a carga sanitária gerada na residência nesse período. Em janeiro de 2022 o TEVAP foi substituído pelo sistema de CWs que foi instalado em 2021. A seguir, encontram-se detalhadas as etapas de concepção inicial, dimensionamento, instalação, operação e monitoramento ambiental objeto dessa pesquisa de tese de doutorado envolvendo CWs.

#### 4.2 Concepção do sistema com definição do fluxograma geral

Objetivando chegar ao melhor desenho de sistema de tratamento, decidiu-se pelo sistema híbrido (reator e filtro anaeróbio seguido de CWs em diferentes configurações). Para esse estudo optou-se pela segregação das águas residuárias geradas na residência em três grupos: águas cinzas, águas negras e de águas de lavagens. No local existe uma rede coletora de água pluvial advinda da cisterna acoplada ao telhado da residência (Figura 9).

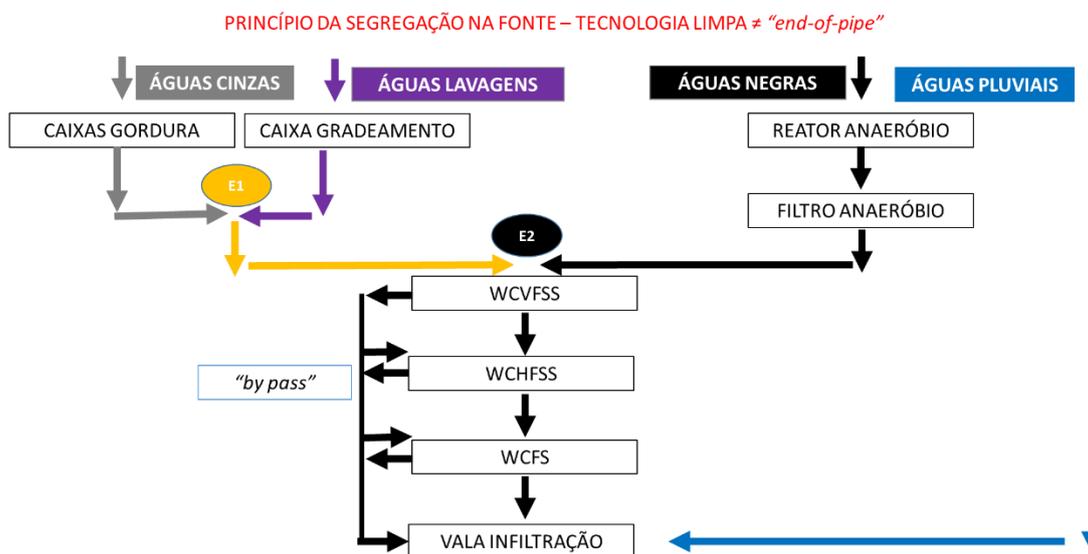


**Figura 9.** Segregação na fonte geradora das diferentes fases do esgoto doméstico.

As águas cinzas são compostas pelo esgoto gerado nas pias utilizadas para lavagem de louças (pratos, talheres, panelas) com elevada concentração de óleos e graxas (materiais flutuantes). As águas negras são compostas pelo esgoto gerado nas privadas domésticas (excretas humanos variados: urina, fezes, sangue, suor, saliva e produtos

químicos em geral) com alto teor de sólidos. As águas de lavagens são compostas pelo esgoto gerado nas atividades de higiene pessoal e do lar como, por exemplo, no banho (chuveiro com utilização de shampoos, condicionadores), nas pias de escovar os dentes e nas máquinas de lavar roupas (máquina e tanque), por esses fatores acabam apresentando quantidade significativa de tensoativos e surfactantes (conferindo a característica presença de espumas na água residuária).

Cada uma dessas frações de esgoto doméstico segue caminhos diferentes em nível de pré-tratamento, tratamento primário e secundário e, após isso, são homogeneizadas em um equalizador tendo, a partir de então, o mesmo destino em nível de tratamento terciário nos CWs (Figura 10).



**Figura 10.** Fluxograma simplificado do sistema de tratamento completo.

As águas cinzas são submetidas ao pré-tratamento em uma série de 3 caixas de gordura com capacidade de 42L (conforme normatização vigente e indicado a seguir no memorial de cálculos) cada, totalizando aproximadamente 120L (em volume útil). Cada caixa de gordura possui um tipo de material construtivo (plástico ou Plástico Reforçado com Fibra de Vidro PRFV), uma geometria específica (cônica circular, cilíndrica, retangular) e um cesto removível para inspeção e limpeza frequente.

As águas de lavagens são submetidas ao pré-tratamento em uma caixa de gradeamento, que funciona com lâmina d'água de 5cm, perfurações de 3,5cm e com capacidade de 250L. Nessa caixa de gradeamento são retidos cabelos, restos de tecidos

de roupas, plásticos e demais materiais grosseiros que são oriundos da rotina de operação diária de uma residência unifamiliar (Figura 11).



**Figura 11.** Indicação das caixas de gordura e gradeamento.

As caixas de gordura e gradeamento instaladas a nível de pré-tratamento preliminar permitem: otimizar a remoção da gordura/óleo flotado, reter a fração de espuma (material flotado), reter pedaços de tecidos, separar sólidos grosseiros e cabelos conduzidos até essa etapa do tratamento. As águas de lavagens (após caixa de gradeamento) são homogeneizadas as águas cinzas (após caixas de gordura) em uma estrutura de concreto de 170L (equalizador I).

As águas negras são submetidas ao tratamento primário no Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) e secundário no Filtro Anaeróbio de Fluxo Ascendente (FAFA) em uma estrutura de Plástico Reforçada com Fibra de Vidro (PRFV) - modelo Tucunaré gentilmente cedido pela BakofTec® Engenharia - com capacidade para absorver taxas de geração diária da ordem de 600 L/d (Figura 12).



**Figura 12.** Tratamento preliminar, primário/secundário.

Após isso, as águas são reunidas em um segundo homogeneizador (equalizador II) de concreto (Figura 13) de volume igual a 170L e, após devidamente misturadas nesse processo de equalização, são submetidas ao tratamento terciário nos WC.



**Figura 13.** Detalhe do homogeneizador geral e registro para controle do fluxo.

O sistema de CWs em questão é denominado híbrido pois utiliza processos anaeróbios (RAFA/FAFA) seguido de CWs (Figura 14).



**Figura 14.** Sistema híbrido de tratamento terciário em WC.

Por fim a água residuária, após tratamento terciário, é direcionada a uma vala de infiltração de área igual a  $8\text{m}^2$  (dimensões de  $2 \times 4\text{m}$  com profundidade  $h = 0,5\text{m}$ ) conforme recomendações dadas pela normatização brasileira (Figura 15).



**Figura 15.** Vala de infiltração final.

Salienta-se, ainda, a existência de um “*by pass*” executado com tubulações/registros de 75mm, concebido em paralelo ao sistema de tratamento, permitindo e facilitando manutenções e alterações de configurações (controle de fluxo).

Além do “*by pass*” as saídas dos CWs são dotadas de caixas contendo gabaritos hidráulicos (de 80, 60 e 30cm, além do dreno a 10cm) para controle de fluxo e ajuste do nível de esgoto dentro do leito filtrante (Figura 16).



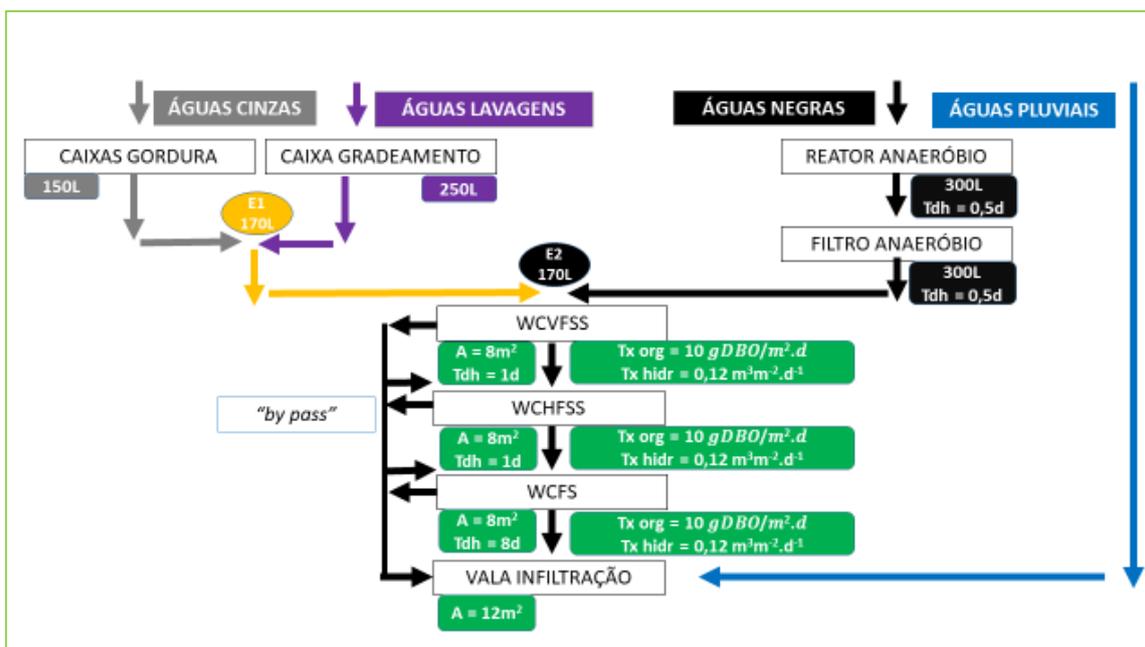
**Figura 16.** Indicação dos registros e gabaritos dentro das caixas de saída.

Essas estruturas (caixas de concreto, tubos, conexões e registros hidráulicos) que compõem o sistema “*by pass*”, atuando em conjunto permitem conduzir o esgoto, pular etapas e propor fluxos alternativos ao utilizado atualmente (funcionamento em série).

Essa estrutura permite, também, conduzir o esgoto para o polimento final em coluna de zeólitas a ser desenvolvida juntamente com o Prof. Marçal Pires na PUC/RS a partir de 02/2024. Observa-se que, no presente estudo, não estão detalhadas dimensões nem volume da coluna de zeólitas, bem como, sua composição. Essa etapa do estudo encontra-se em fase de projeto e desenvolvimento para definir dimensões da coluna, selecionar zeólitas, sintetizar volume necessário de zeólitas, montar estrutura e proceder monitoramento da performance ambiental.

Por fim, está prevista a consolidação de uma barreira vegetal no entorno dos CWs. Essa barreira vegetal está sendo composta por plantas nativas de crescimento rápido (bracatinga ou frutíferas nativas locais como ameixeira, cedro, pitangueira, etc.) e

posicionadas de maneira a não prejudicar a incidência de radiação solar nos CWs. Uma vez instalada, essa cortina vegetal auxilia na quebra do vento e contenção de odores indesejáveis gerados na operação do sistema e sua manutenção (remoção de sedimentados e flutados da caixa de gordura, remoção de lodo acumulado, podas constantes, etc.) também deverá ser observada e realizada anualmente (conforme recomendado por normas de projeto). O sistema de saneamento unifamiliar proposto aparece na Figura 17 a seguir dimensionado (ANEXO B contém as configurações construtivas e detalhamento do Memorial de Cálculo adotado).



**Figura 17.** Fluxograma do sistema de tratamento: volumes, áreas e taxas de aplicação.

O espaço entre os WC permite a livre circulação de pessoas para coleta de amostras, inspeção e manutenção do sistema. Está previsto o cercamento da área com tela na altura adequada (controlando o acesso de pessoas e animais).

#### 4.3 Testes pré-operacionais, inserção das plantas e início de operação do sistema

Após a conclusão das obras o sistema sanitário foi preenchido com água do sistema de abastecimento. Dessa maneira procederam-se ensaios hidráulicos a fim de verificar o bom funcionamento das tubulações, registros, geomembrana e "by pass". O sistema manteve os níveis de altura quando selecionado, desde 80cm de leito totalmente

saturado até totalmente drenado (10cm) comprovando assim sua estanqueidade pelo período mínimo de 96h ou 4d.

Essa etapa inicial (testes, inserção plantas e partida) ocorreu em dezembro de 2021. A partir do mês de janeiro de 2022 o esgoto passou a ser diluído até preencher completamente 100% o sistema.

As plantas cultivadas dentro dos CWs são da espécie *Thypha dominguensis*, *Heliconia bihai* e *Zantedeschia aethiopica*. No estágio *floating* predomina *Eichornia crassipes* e *Lemna minor*. Na disposição final encontram-se: *Dicotyledoneae spp.*; *Hedychium coronarium J.Koenig*; *Heliconia bihai*; *Musa spp*; *Zantedeschia aethiopica* e *Colocasia gigantea*. As plantas promovem o embelezamento natural e harmonia paisagística no local auxiliando na assimilação de oxigênio e fixação de nutrientes. A inserção dos rizomas foi realizada conforme material informativo publicado pelo Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Em relação a etapa de inserção das plantas o estágio inicial em janeiro de 2022 encontra-se exposto na Figura 18.



**Figura 18.** Inserção de mudas matrizes iniciais.

No início do primeiro ano de operação optou-se por trabalhar com o leito parcialmente saturado (40cm de esgoto nos WCVFSS e WCHFSS). Isso prejudicou o desenvolvimento das plantas. Após um ano de operação ajustou-se o nível para totalmente saturado (80cm de esgoto nos WCVFSS e WCHFSS). A partir dessa ação, foi realizado o replantio (Figura 19) de mudas no mês de janeiro de 2023.



**Figura 19.** Ação de ajuste do nível e replantio.

Com esta ação foi obtido bom desenvolvimento das plantas como pode ser averiguado na Figura 20.



**Figura 20.** Estágio atual do desenvolvimento das plantas.

Na vala de infiltração final dimensionada, foram inseridas espécies variadas (caetés, copo de leite, lírio do brejo, bananeira, dicotiledônea, papiro grande, papiroinho, orelha de elefante, e taboa) (Figura 21).



**Figura 21.** Detalhe da vala de infiltração que atua enquanto disposição final.

A exemplo das plantas inseridas dentro dos WCVFSS, WCHFSS e WCF, as plantas colocadas dentro da vala de infiltração também se encontram em pleno desenvolvimento (Figura 22), demonstrando boa adaptação ao local (clima e altitude) bem como, à toxicidade apresentada pelo esgoto.



**Figura 22.** Estágio atual de desenvolvimento das plantas na vala de infiltração.

As plantas apresentam diversas florações anuais (Figura 23) corroborando estarem saudáveis e perfeitamente adaptadas.



**Figura 23.** Floração das plantas na vala de infiltração final.

As coletas das espécies vegetais ocorreram na área indicada na Figura 24, localizada em frente a área do projeto estando adaptada a altitude e faixas de temperatura local.



**Figura 24.** Área de obtenção das plantas da espécie *Thypha dominguensis*.

Por último, cabe ressaltar nesse capítulo que, as plantas utilizadas pelos autores do trabalho possuem autorização para coleta de espécies vegetais fora de UCs. Há

comprovante de registro para coleta de material botânico, fúngico e microbiológico em território brasileiro.

A partir de março de 2022, quando efetivamente o sistema sanitário foi preenchido com 100% de esgoto doméstico e teve a inserção das plantas, iniciou-se a etapa de monitoramento ambiental.

#### 4.4 Monitoramento ambiental

Na execução da proposta de trabalho foram utilizados equipamentos e demais materiais de consumo de propriedade da UNISC e UERGS. Foi utilizado veículo particular para deslocamento e transporte das amostras entre os pontos de coleta e os laboratórios para análises. As amostras foram coletadas em condições normais de temperatura e pressão. Foram determinados 14 pontos de coleta para o monitoramento conforme Tabela 4.

**Tabela 4.** Descrição dos 14 pontos monitorados.

| Ponto | Descrição do ponto              | Nível de tratamento | Condição                       |
|-------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| P1    | Caixa gordura nº1               | Preliminar          | Bruto                          |
| P2    | Caixa gordura nº3               | Preliminar          | Em tratamento                  |
| P3    | Homogeneizador cinza + lavagens | Preliminar          | Em tratamento                  |
| P4    | Entrada RAFA                    | Primário            | Bruto                          |
| P5    | Saída RAFA                      | Primário            | Em tratamento                  |
| P6    | Saída FAFA                      | Secundário          | Em tratamento                  |
| P7    | Homogeneizador geral            | Secundário          | Em tratamento                  |
| P8    | Entrada WCVFSS                  | Terciário           | Em tratamento                  |
| P9    | Saída WCVFSS                    | Terciário           | Tratado                        |
| P10   | Entrada WCHFSS                  | Terciário           | Tratado                        |
| P11   | Saída WCHFSS                    | Terciário           | Tratado                        |
| P12   | Saída WCF                       | Terciário           | Tratado                        |
| P13   | Disposição final                | Disposição final    | Tratado                        |
| P14   | Água torneira (abastecimento)   | Consumo humano      | In natura – clorada fluoretada |

Foi elaborada uma planilha de monitoramento para as coletas com o intuito de agregar informações para fundamentar a discussão dos resultados. Foram coletadas informações referentes aos índices de precipitação pluviométrica na região durante o período de estudo. Foram utilizados frascos de coleta (vidro e plásticos), equipamentos e reagentes necessários para a preservação das amostras, conforme descrito na Tabela 5.

**Tabela 5.** Descrição dos equipamentos utilizados.

| Equipamento                 | Descrição de uso                                   |
|-----------------------------|--|
| Sonda multiparâmetro        | Leitura de pH, OD, condutividade e salinidade      |
| Termômetro digital          | Aferir temperatura                                 |
| Disco de Secchi             | Medição de transparência                           |
| Turbidímetro                | Leitura de turbidez                                |
| Frascos de plástico e vidro | Coleta de amostras                                 |
| Reagentes (ácidos e bases)  | Preservação das amostras para análises posteriores |
| Caixas térmicas             | Acondicionamento e refrigeração das amostras       |

O controle analítico envolveu ensaios de oxigênio dissolvido (OD), temperatura, pH, condutividade, salinidade, turbidez, Carbono Orgânico Total (COT), DQO, N (amoniacoal e total) e P (total) nos pontos de coleta previamente selecionados. No segundo ano de monitoramento (2023) foram realizados ensaios de genotoxicidade e microbiológicos (contagem de ovos de helmintos e coliformes termotolerantes).

#### 4.5 Processamento da informação

Para cálculos e gráficos foi utilizado o software Excel. O software permite cadastrar os pontos de coletas adicionando diversas informações como: local, hora, temperatura do ar, altitude, longitude, latitude, condição climática, corpo hídrico e o que mais for necessário. O software possibilita incluir amostras de forma organizada, após obter o valor do cada uma delas a cada campanha de coleta referente a cada ponto de coleta.

Os resultados serão apresentados no formato de artigos nos próximos capítulos:

- Artigo 1: contendo revisão bibliométrica acerca do tema;
- Artigo 2: contendo resultados analíticos da performance ambiental do sistema ao longo do período de dois anos de monitoramento (2022-2023), avaliação da pegada hídrica e resultados de análises de genotoxicidade do tratado; e
- Artigo 3: contendo avaliação de ciclo de vida e cálculo da pegada de carbono do sistema.

## **5 ARTIGO I - ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA: SANEAMENTO DESCENTRALIZADO COM APLICAÇÃO DE WETLANDS CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

O artigo I é intitulado: Análise bibliométrica: saneamento descentralizado com aplicação de wetlands construídos no tratamento de águas residuárias.

Esse artigo propôs revisão de literatura e análise bibliométrica sobre aplicação de wetlands construídos para o tratamento de esgoto doméstico em escala unifamiliar.

Principais resultados atingidos:

- Os indicadores bibliométricos não são medidas reais subjetivas de qualidade da pesquisa (dados qualitativos) sendo apresentados na forma quantitativas (mais publicados, mais citados, mais recorrentes, etc.);

- Os trabalhos apontam diversas vantagens dos CWs com destaque para baixo custo de manutenção, alta performance ambiental com excelentes eficiências de remoção;

- Projetos de CWs podem ser dimensionados para receber águas residuárias de fontes pontuais (esgotos domésticos de origem uni ou multifamiliar, de pequenas comunidades urbanas e periurbanas, de comunidades rurais afastadas, de atividades hoteleiras e turísticas, de campus universitário, de agroindústria familiar, etc.);

- CWs produzem efluentes apresentando bons indicadores de qualidade (em média apresentam eficiências de remoção superiores a 70% para DBO, DQO, Ntotal, Ptotal, turbidez, sólidos totais e coliformes) atendendo as legislações mais restritivas existentes para lançamento de efluentes e reuso.

## **6 ARTIGO II - WETLANDS CONSTRUÍDOS NO TRATAMENTO TERCIÁRIO DE ESGOTO DOMÉSTICO: LAYOUT DE OPERAÇÃO COM AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA E PEGADA HÍDRICA DE SISTEMA SANITÁRIO UNIFAMILIAR**

O artigo II é intitulado: Wetlands Construídos no tratamento terciário de esgoto doméstico: layout de operação com avaliação da eficiência e pegada hídrica de sistema sanitário unifamiliar.

Esse artigo detalhou o layout de operação de um sistema de CWs apresentando a avaliação da performance ambiental do tratamento com base na análise de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos apresentando também o cálculo de pegada hídrica das etapas do sistema.

Principais resultados atingidos:

- Embora dimensionado para  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  ( $30 \text{ m}^3/\text{mo}$ ) o sistema sanitário recebeu em média  $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  ( $15 \text{ m}^3/\text{mo}$ ) no período monitorado;

- A área instalada em WC para tratamento terciário ( $24 \text{ m}^2$  somando WC vertical, horizontal e *floating*) supera o indicado em norma extraordinária ( $8 \text{ m}^2$ );

- As máximas eficiências de remoção apresentadas foram: fósforo total 91%, DQO 85%, nitrogênio amoniacal 71%, turbidez 91%, salinidade 75%, condutividade 77%, P 75% e DQO 73%;

- Os valores de pegada hídrica do efluente bruto em relação ao efluente tratado reduziram em aproximadamente 90%, tendo valores de  $825 \text{ m}^3$  no efluente bruto para  $75,6 \text{ m}^3$  no último estágio da unidade de tratamento; e

- Os CWs condicionam a água residuária para reuso urbano pois atende os limites da CONSEMA 419/2020 para pH (entre 6 – 9) e condutividade ( $< 3 \text{ dS/m}$ ). O projeto é aplicação de tecnologia ambiental em escala real, promovendo saneamento descentralizado e consolidando o desenvolvimento sustentável.

## **7 ARTIGO III - WASTEWATER TREATMENT IN SINGLE FAMILY SCALE WITH FLOATING CONSTRUCTED WETLAND ASSOCIATED IN INTEGRATED SYSTEM: LIFE CYCLE ANALYSIS AND CARBON FOOTPRINT IN THE CONSTRUCTION AND START-UP STAGES**

O artigo III é intitulado: ANÁLISE DE CICLO DE VIDA E PEGADA DE CARBONO DE SISTEMA WETLANDS CONSTRUÍDOS EM UNIDADE UNIFAMILIAR

Esse artigo detalhou o levantamento de dados para inventário de ciclo de vida e posterior determinação de análise de ciclo de vida e da pegada de carbono da etapa de construção do sistema sanitário.

Principais resultados atingidos:

- Além das características visuais os WC também melhoram as propriedades físicas, químicas e microbiológicas do esgoto doméstico ao longo do tempo, contribuindo diretamente na manutenção dos indicadores de qualidade ambiental dos recursos hídricos;

- As avaliações de ACV Impact 2002+ e ACV de Pegada de Carbono, demonstram a necessidade de continuar com pesquisas para materiais alternativos nas construções do WCs;

- Mesmo sistemas “desmaterializados”, os Human Health e CO<sub>2</sub> uptake ainda necessitam aumento de investigação e eficiência; e

- Enquanto perspectiva futura de trabalho está o levantamento de diretrizes para enquadrar a água oriunda do sistema para o reuso local, que é a utilização da água residuária para diversas finalidades, exceto para o consumo humano (NBR n° 13969/1997).

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os CWs têm a capacidade de reduzir o potencial poluidor do esgoto doméstico após o tratamento primário/secundário. Além das características visuais, os CWs melhoram as propriedades físicas, químicas e microbiológicas do esgoto doméstico, contribuindo diretamente na manutenção dos indicadores de qualidade ambiental dos recursos hídricos. O trabalho propiciou, até o presente momento, significativo avanço no que tange a: planejamento, projeto de dimensionamento, obras de execução/instalação, operação, monitoramento e manutenção de WC aplicado a residências unifamiliares no Brasil.

Constata-se que promover o tratamento terciário nem sempre é fácil sendo, pelo contrário, por vezes bastante complicado em função de topografia, acesso aos elementos constituintes do sistema sanitário. Em função da inflação no preço de materiais de construção bem como na alta elevada do valor de mão de obra, promover tratamento terciário é oneroso do ponto de vista financeiro. Os custos de implantação são altos (material e mão de obra), porém, os custos com manutenção observados em 01 ano de operação são nulos (sem consumo de energia, sem consumo de insumos). O único investimento realizado em operação foi tempo para manejo das plantas (replantio e poda rasa). Não estão contabilizados aqui custos com monitoramento ambiental.

Em relação ao custo total do projeto, salienta-se tratar de projeto piloto o que requer maiores investimentos (o modelo pode ser condensado e otimizado). Dessa maneira pode-se verificar, de modo aproximado, que para construir 24m<sup>2</sup> de WC mais 8m<sup>2</sup> de vala de infiltração final, o custo total é de R\$ 32.000,00 o que nos dá a relação de R\$ 1.000,00 (R\$32/32m<sup>2</sup>) por metro quadrado construído para um sistema sanitário individual completo (preliminar, primário, secundário, terciário e disposição final).

Considerando que, conforme indicado no memorial de cálculo, seriam necessários 8m<sup>2</sup> para a residência unifamiliar em questão, o valor investido gira em torno de R\$ 8.000,00 para um sistema sanitário individual completo (preliminar, primário, secundário, terciário e disposição final).

Observa-se que essa relação de custo x benefício pode, ainda, ser melhorada na medida em que alguns parâmetros de projeto podem ser modificados (simular cálculos com padrão de geração médio ou baixo, área onde se localiza o projeto (faixa de temperatura), tempo de limpeza para remoção do lodo, disponibilidade de matéria-prima,

custo com transporte de material de empréstimo/bota fora para aterro/escavação, perfil do esgoto gerado, etc.

Os resultados alcançados indicam a possibilidade de reuso. As condições adequadas para permitir a evolução das SBN estão sendo gradativamente ampliadas e aceitas, como no caso dos CWs, auxiliando na consolidação do desenvolvimento sustentável. Enquanto recomendações, a fim de garantir o bom funcionamento de um sistema de CWs, recomenda-se as seguintes ações:

- a) Limpeza contínua e frequente do sistema de pré-tratamento (gordura/gradeamento);
- b) Proceder a limpeza anual do sistema (pois foi dimensionado com base nessa informação constante na NBR pertinente);
- c) Criar *checklist* dos procedimentos de operação e limpeza do sistema de tratamento atribuindo responsáveis (empresa de consultoria ambiental) para cada tarefa;
- d) Evitar a disposição de materiais estranhos na tubulação de coleta e distribuição de esgoto no sistema de tratamento;
- e) Realizar o manejo das plantas promovendo o corte raso duas vezes ao ano (no período de verão e inverno) evitando a desorção de nutrientes no próprio sistema;
- f) Realizar o monitoramento do fluxo de água nas caixas de inspeção, evitando anomalias e entupimentos de maneira preditiva e preventiva; e
- g) Realizar o monitoramento do sistema nos termos da CONSEMA nº 355/2017 e dos órgãos legais competentes que, por tratar-se de empreendimento de impacto local, tem sua fiscalização para efeitos de licenciamento a cargo das secretarias municipais de Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS) e de Planejamento, Urbanismo, Habitação e Gestão.

## 9 PERSPECTIVAS FUTURAS

Enquanto perspectiva futura de trabalho pretende-se desenvolver os artigos IV, V e VI durante o primeiro e segundo semestre de 2024.

O artigo IV contará com resultados detalhados contendo perfil de ecotoxicidade, carbono orgânico total e nitrogênio total do sistema em estudo. Terá ainda uma breve discussão sobre o papel da linha de pesquisa tecnologias para o tratamento de águas de abastecimento e águas residuárias para consolidação do saneamento e terá como objeto de publicação revista de circulação internacional.

O artigo V contará com descrição de possíveis incentivos fiscais ambientais ao sistema de CWs, trazendo aspectos e impactos da implantação do IPTU verde no município de São Francisco de Paula, RS, Brasil e terá como objeto de publicação revista de circulação nacional.

O artigo VI divulgará as ações de ensino, pesquisa e extensão que permeiam o projeto de tese de doutorado desenvolvido e terá como objeto de publicação revista de circulação nacional.

O projeto de tese está registrado em fluxo contínuo junto a Pró Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da UERGS sob o título denominado: Saneando o básico – ANO 2024; e continuará sendo desenvolvido em caráter de pesquisa. O projeto também está registrado junto a Pró-Reitora de Extensão em caráter de extensão em 2024 na busca de auxílio para manutenção de dois bolsistas de iniciação científica.

O autor buscará submeter o projeto a possíveis editais que fomentem e viabilizem a continuidade da pesquisa (equipamentos, material de expediente, insumos, recursos humanos). O autor buscará possibilidade de pós-graduação em nível seguinte (editais de fomento ao pesquisador recém-doutor). O autor seguirá divulgando o projeto, a universidade, o programa de pós-graduação e a ciência nacional desenvolvida no nível superior na linha de pesquisa tecnologias de tratamento de águas de abastecimento e de águas residuárias. Ainda, enquanto perspectivas futuras de trabalhos:

- a) Seguir executando o monitoramento ambiental (parâmetros físico-químicos, microbiológicos, ecotoxicidade e genotoxicidade) contínuo e frequente (UNISC/UFRGS/PUC/FEEVALE/UERGS) envolvendo acadêmicos da graduação, pós-graduação, mestrado e doutorado. Desenvolver estudos a nível de pós-doutorado;

- b) Desenvolvimento de produtos (inovações tecnológicas para o mercado de saneamento) em parceria com alunos da graduação e pós-graduação da Uergs, em especial da Unidade Universitária Hortênsias (curso de Gestão Ambiental, especialização em Prática para Sustentabilidade e mestrado profissional em Ambiente e Sustentabilidade) e demais cursos com potencial de agregar empreendedorismo/inovações (Engenharia de Energia, Ciências da Computação, Agronomia) como, por exemplo, projeto e execução de uma coluna com sachês de zeólitas para polimento final de esgoto doméstico (em conjunto com o Prof. Dr. Marçal Pires PUC/RS) e, também, o aperfeiçoamento de uma caixa de gordura autolimpante (mestrado profissional PPGAS da UERGS em 2025 e setor de P&D – Planejamento, Projeto e Desenvolvimento de Produto da BakofTec® Engenharia);
- c) Elaborar tabela de dimensionamento com volumes pré-determinados de CWs para atender determinado número de pessoas gerando volumes específicos de esgoto (padrão baixo, médio ou alto);
- d) Elaborar, publicar e divulgar cartilha/manual com roteiro prático para dimensionar e instalar sistema de CWs em unidades residenciais (uni ou multifamiliar); e
- e) Protótipos para medição/extração de bioenergia de sistemas de CWs com desenvolvimento da melhor configuração de par de eletrodos (ânodo/cátodo).

## **10 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O DOUTORADO**

Durante o doutorado foram realizadas diferentes ações no âmbito do ensino, da pesquisa e da extensão:

- a) Educação ambiental apoiada em ações de extensão divulgando o projeto em busca de reconhecimento regional, estadual e nacional; e
- b) Elaboração de minuta de projeto de lei municipal prevendo pagamento por serviços ambientais e/ou incentivos fiscais (elaborar proposta de projeto de lei de redução no IPTU fundamentado nas Ciências Contábeis) para quem adotar a tecnologia de CWs nos municípios brasileiros.

Por fim, essas ações descritas, bem como as perspectivas futuras expostas, demonstram, sem restar sombra de dúvida, que o projeto transita em diversas áreas do conhecimento (engenharia, biologia, química, física, geografia, história, política, tecnologia, gestão) sendo multidisciplinar e tem resultados transversais práticos aplicados ao cotidiano dos habitantes residentes na área do projeto, impactando positivamente nas áreas vizinhas.

Esse caráter interdisciplinar somado a transversalidade do tema, permitem abordagens diversas, mantendo o projeto ativo pelas próximas décadas, colocando em prática tecnologia ambiental para promoção do saneamento básico através da educação fomentada pelo ensino de qualidade, pelas ações de extensão arquitetadas e pela pesquisa científica desenvolvida em nossa nação.

Que possamos continuar visualizando e fazendo da tecnologia ambiental o esteio para amparar decisões, guiar políticas públicas, prevenir, remediar e recuperar situações rotineiras (como no caso, a geração de esgoto doméstico) que degradam o ambiente para a qualidade de vida. Que possamos aprimorar métodos, criar tecnologias, desenvolver equipamentos, mantendo a qualidade do ambiente para a subsistência dessa e das próximas gerações.

## 11 REFERÊNCIAS

### **Do texto contendo introdução, objetivos e metodologia geral da tese:**

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 1993. Norma NBR 7229/1993 - Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, BR, 1993a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 1997. Norma NBR 13969/1997 - Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, BR, 1997a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1999. Norma NBR 8160/1999 – Sistemas prediais de esgoto sanitário - Projeto e execução. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, BR, 1999a.

BARROS, R. T. V. et al. Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios. Belo Horizonte: UFMG, 1995. 221p.

BRAGA J., BENEDITO, P. F. et al. Introdução à engenharia ambiental. São Paulo: Prentice Hall. 2ª Edição, 2005.

BRASIL. Constituição (1988). Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Constituicao/Constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm)>. Acesso em: 03 jul. 2012.

BOUTIN, C.; EME, C. *Domestic Wastewater Characterization by Emission Source*. Disponível em: <<https://hal.science/hal-01469077/>>. Acesso em: 8 jul. 2023.

COLARES, G. S. et al. *Influence of loading rates and feeding conditions on hybrid constructed wetlands integrated with microbial fuel*. v. 194, p. 107014–107014, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857423001234> Acesso em: 1 set. 2022.

COMISSÃO EUROPEIA - Soluções Baseadas na Natureza e os Desafios da Água: acelerando a transição para cidades mais sustentáveis. Relatório *Dialogues European Union – Brazil*. Manuscrito completo. Luxemburgo: Serviço das Publicações da União Europeia, 2022.

DATE, M. et al. *Zero liquid discharge technology for recovery, reuse, and reclamation of wastewater: A critical review*. *Journal of Water Process Engineering*, v. 49, p. 103129, Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714422005736> Acesso em: 1 out. 2022.

DEAN, S. et al. *Microcosm Study on the Potential of Aquatic Macrophytes for Phytoremediation of Phosphorus-Induced Eutrophication*. *Sustainability*, v. 14, n. 24, p. 16415, Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/24/16415> Acesso em: 8 dez. 2022.

DUBOIS, V.; FALIPOU, E.; BOUTIN, C. *Quantification and qualification of the urban domestic pollution discharged per household and per resident*. *Water Science and Technology*, v. 85, n. 5, p. 1484–1499, Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article/85/5/1484/87065/Quantification-and-qualification-of-the-urban> Acesso em: 18 fev. 2022.

ELZEIN, Z., ABDU, A., & ELGAWAD, I. A. *Constructed Wetlands as a sustainable wastewater treatment method in communities*. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 605–617. 2016.

FERNÁNDEZ DEL CASTILLO, A. et al. *A review of the sustainability of anaerobic reactors combined with constructed wetlands for decentralized wastewater treatment*. *Journal of Cleaner Production*, v. 371, p. 133428, 15 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622030104> Acesso em: out. 2022.

FERREIRA, A. et al. *Hybrid Decentralized Systems of Non-potable Water Supply: Performance and Effectiveness Analysis*. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-023-03531-y> Acesso em: 11 maio 2023.

FILHO, José D. V. de Souza; LIMA, Ari C. A. de; ESTEFANUTTI, Ronaldo; SILVA, Wildson M. B. da; NETO, Moisés Bastos; GARCIA, Enrique Vilarrasa-; LOIOLA, FUNASA, Brasília, 2020. Fundação Nacional de Saúde. Manual de Saneamento. 5ª Edição.

GIOVANNINI, S.G.T. & MARQUES, D. M. L. M. *Conditioning Factors for Establishment of *Zizaniopsis bonariensis* in Constructed Wetlands*. In: *International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, 6. Eds Tauk-Tornisielo, S.M. and Salati, E.F. *Proceeding*. Águas de São Pedro, Brasil, p. 559- 568, 1998.

GONÇALVES, F. B.; SOUZA, A. P. *Disposição oceânica de esgotos sanitários: história, teoria e prática*. – Rio de Janeiro: ABES, 1997. 348p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Brasileiro de 2022*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

- JIANG, L.; CHUI, T. F. M. *A review of the application of constructed wetlands (CWs) and their hydraulic, water quality and biological responses to changing hydrological conditions.* *Ecological Engineering*, Acesso em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857421003141> v. 174, p. 106459, Acesso em: jan. 2022.
- KADLEC, R.H. & KNIGHT, R.L. *Treatment Wetlands.* CRC Press, Boca Raton, Fl. 893pp. 1996.
- KHAN, S. et al. *Emerging contaminants of high concern for the environment: Current trends and future research.* *Environmental Research*, v. 207, p. 112609, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935121019101> Acesso em: maio 2022.
- KOUL, B. et al. *Insights into the Domestic Wastewater Treatment (DWWT) Regimes: A Review.* *Water*, v. 14, n. 21, p. 3542, Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/21/3542> Acesso em: 4 nov. 2022.
- KUMAR, V. et al. *Investigating bio-remediation capabilities of a constructed wetland through spatial successional study of the sediment microbiome.* *npj clean water*, v. 6, n. 1, Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41545-023-00225-1> Acesso em: 16 fev. 2023.
- LIM, S. et al. *Ozonation of organic compounds in water and wastewater: A critical review.* *Water Research*, v. 213, p. 118053, Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35196612/> Acesso em: abr. 2022.
- MASOUD, A. M. N.; ALFARRA, A.; SORLINI, S. *Constructed Wetlands as a Solution for Sustainable Sanitation: A Comprehensive Review on Integrating Climate Change Resilience and Circular Economy.* *Water*, v. 14, n. 20, p. 3232, Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/20/3232> Acesso em: 13 out. 2022.
- OLIVIER, L. et al. *Statistical analysis of the effluent quality of 231 on-site sanitation facilities in France monitored during a 6-year period.* *Water Science and Technology*, v. 80, n. 2, p. 203–212, Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article/80/2/203/68974/Statistical-analysis-of-the-effluent-quality-of> Acesso em 15 jul. 2019.
- ONU. Organização das Nações Unidas. *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.* 2018. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/pos2015/>> Acesso em 01/03/2023.

- PARTYKA, M. L.; BOND, R. F. Wastewater reuse for irrigation of produce: A review of research, regulations, and risks. *Science of The Total Environment*, v. 828, p. 154385, Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35271919/> Acesso em: jul. 2022.
- PAT-ESPADAS, A. et al. *Review of Constructed Wetlands for Acid Mine Drainage Treatment*. *Water*, v. 10, n. 11, p. 1685, Disponível e: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/11/1685> Acesso em: 19 nov. 2018.
- PISHGAR, R. et al. *Characterization of domestic wastewater released from “green” households and field study of the performance of onsite septic tanks retrofitted into aerobic bioreactors in cold climate*. *Science of The Total Environment*, v. 755, p. 142446, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720359751> Acesso em: 10 fev. 2021.
- PHILLIPI, L. S. & COSTA R. H. R. *Domestic Effluent Treatment Through Integrated System of Septic Tank and Root Zone*. In: *International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, 6. Eds Tauk-Tornisielo, S.M. and Salati, E.F. Proceeding. Águas de São Pedro, Brasil, p. 670- 679, 1998.
- PRICE T., PROBERT D., *Role of constructed Wetlands in environmentally-sustainable development*, *Appl. Energy*, 1997, 57 (2–3), 129.
- ROQUETE PINTO, C. L.; PALADINO, L. T.; TEOBALDO, J. M; ANTUNES. *Integrated Rural Sustainable Development with Aquatic Plants*. In: *International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, 6. Eds Tauk-Tornisielo, S.M. and Salati, E.F. Proceeding. Águas de São Pedro, Brasil, p. 660-669, 1998.
- SALATI, E. & RODRIGUES, N.S. *De poluente a nutriente, a descoberta do aguapé*. *Revista Brasileira da Tecnologia*, 13 (3): 37-42, 1982.
- SALATI, E., et al “Método fitopedológico de despoluição de águas” São Paulo: Fundação Salim Farah Maluf, 1984.
- SEZERINO, P. H. *Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed Wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical*. 2006. 171 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- SOUSA, J. T.; VAN HAANDEL A. C.; CONSENTINO P. R. S.; GUIMARÃES A. V. R. Pós-tratamento efluentes de reator UASB utilizando sistemas “Wetlands ” construídos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 4, n. 1, p. 87-91, 2004.

SANTOS, C.; Otimização Ambiental do Uso de Água em Edifícios [PhD Thesis]. Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto (FEUP), 2012.

SILVA, S. C. *Wetlands Construídos” de Fluxo Vertical com Meio Suporte de Solo Natural Modificado no Tratamento de Esgotos Domésticos”* 205p., ENC/FT/UnB, Doutor, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2007. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

SOME, S. et al. *Microbial pollution of water with special reference to coliform bacteria and their nexus with environment*. Energy Nexus, v. 1, p. 100008, Disponível em: [sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427121000085](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427121000085) Acesso em: nov. 2021.

SHAWKAT MIZZOURI, N.; AHMED KOCHARY, S.; BARWARI, N. *Decentralized sanitation solutions for temporal Internally Displaced people (IDPs) and refugees camps and residential complexes in Duhok province – Case study*. Ain Shams Engineering Journal, v. 13, n. 4, p. 101706, Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209044792200017X> Acesso em: jun. 2022.

SHUKLA, A. et al. *A review on effective design processes of constructed wetlands*. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 19, n. 12, p. 12749–12774, Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/353413525\\_A\\_review\\_on\\_effective\\_design\\_processes\\_of\\_constructed\\_wetlands](https://www.researchgate.net/publication/353413525_A_review_on_effective_design_processes_of_constructed_wetlands) Acesso em: 22 jul. 2021.

TAKEUCHI, H.; TANAKA, H. *Advances in Wastewater Reclamation and Reuse Technologies: Selected Case Study Projects in Japan*. p. 21–30, Disponível em [https://www.researchgate.net/publication/359172369\\_Advances\\_in\\_Wastewater\\_Reclamation\\_and\\_Reuse\\_Technologies\\_Selected\\_Case\\_Study\\_Projects\\_in\\_Japan](https://www.researchgate.net/publication/359172369_Advances_in_Wastewater_Reclamation_and_Reuse_Technologies_Selected_Case_Study_Projects_in_Japan) Acesso em: 1 jan. 2022.

TSUTIYA, M. T.; SOBRINHO, P. A. Coleta e transporte de esgoto sanitário. - 1ª ed. – São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

VALENTIM, M. A. A. & ROSTON, D. M. *Project of Constructed Wetland for Treating Septic Tank Effluent*. In: *International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, 6. Eds Tauk-Tornisielo, S.M. and Salati, E.F. Proceeding. Águas de São Pedro, Brasil, p. 126- 129, 1998.

VYMAZAL, J. Constructed *Wetlands* for wastewater treatment. *Water*, Vol. 2, n. 3, p. 530-549. 2010.

VYMAZAL, J. *The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. *Land*, v. 11, n. 2, p. 174, Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/2/174> Acesso em: 21 jan. 2022.

VON SPERLING, M.. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 1996.

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P. H. (2018). *Dimensionamento de Wetlands Construídos no Brasil*. *Boletim Wetlands Brasil, Edição Especial, dezembro/2018*.

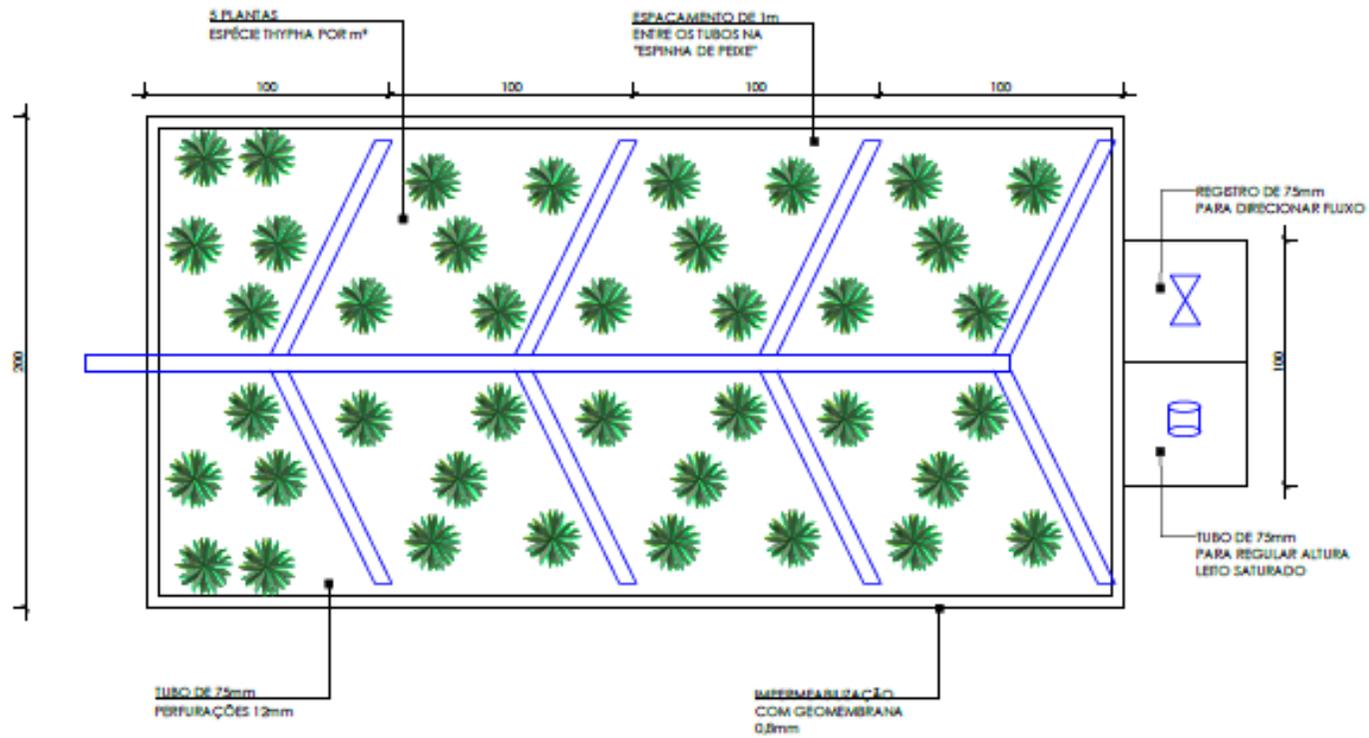
WANG, J. et al. *A Review on Microorganisms in Constructed Wetlands for Typical Pollutant Removal: Species, Function, and Diversity*. *Frontiers in Microbiology*, v. 13, 5 Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35450286/> Acesso em: abr. 2022.

WANG, M.; ZHU, J.; MAO, X. *Removal of Pathogens in Onsite Wastewater Treatment Systems: A Review of Design Considerations and Influencing Factors*. **Water**, v. 13, n. 9, p. 1190, Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/9/1190> Acesso em: 25 abr. 2021.

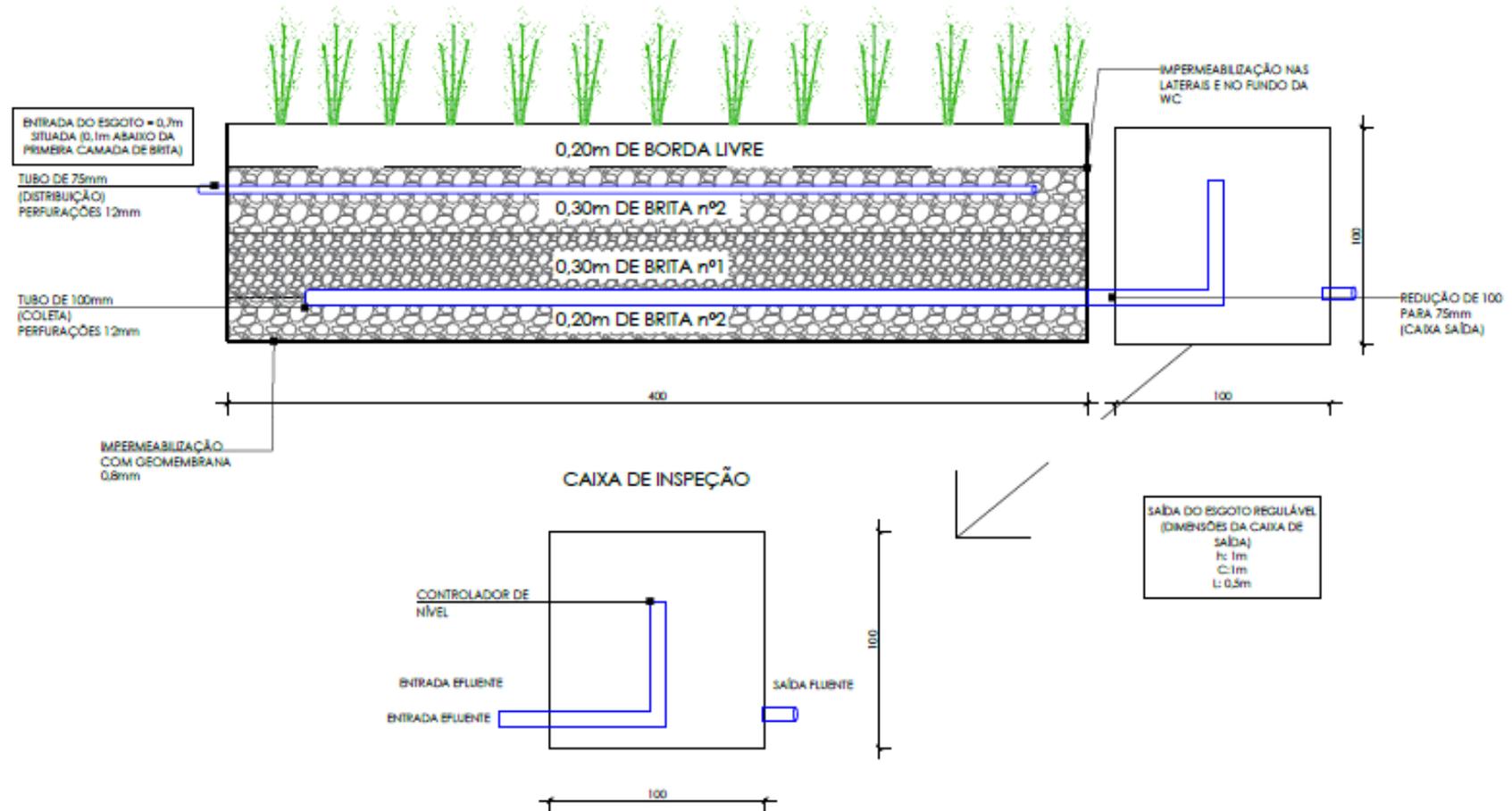
ZHAO, X.; BAI, S.; ZHANG, X. Establishing a decision-support system for eco-design of biological wastewater treatment: A case study of bioaugmented constructed wetland. *Bioresource Technology*, v. 274, p. 425–429, fev. 2019.

## ANEXO A – DESENHOS EM AUTOCAD COM VISTAS DO PROJETO

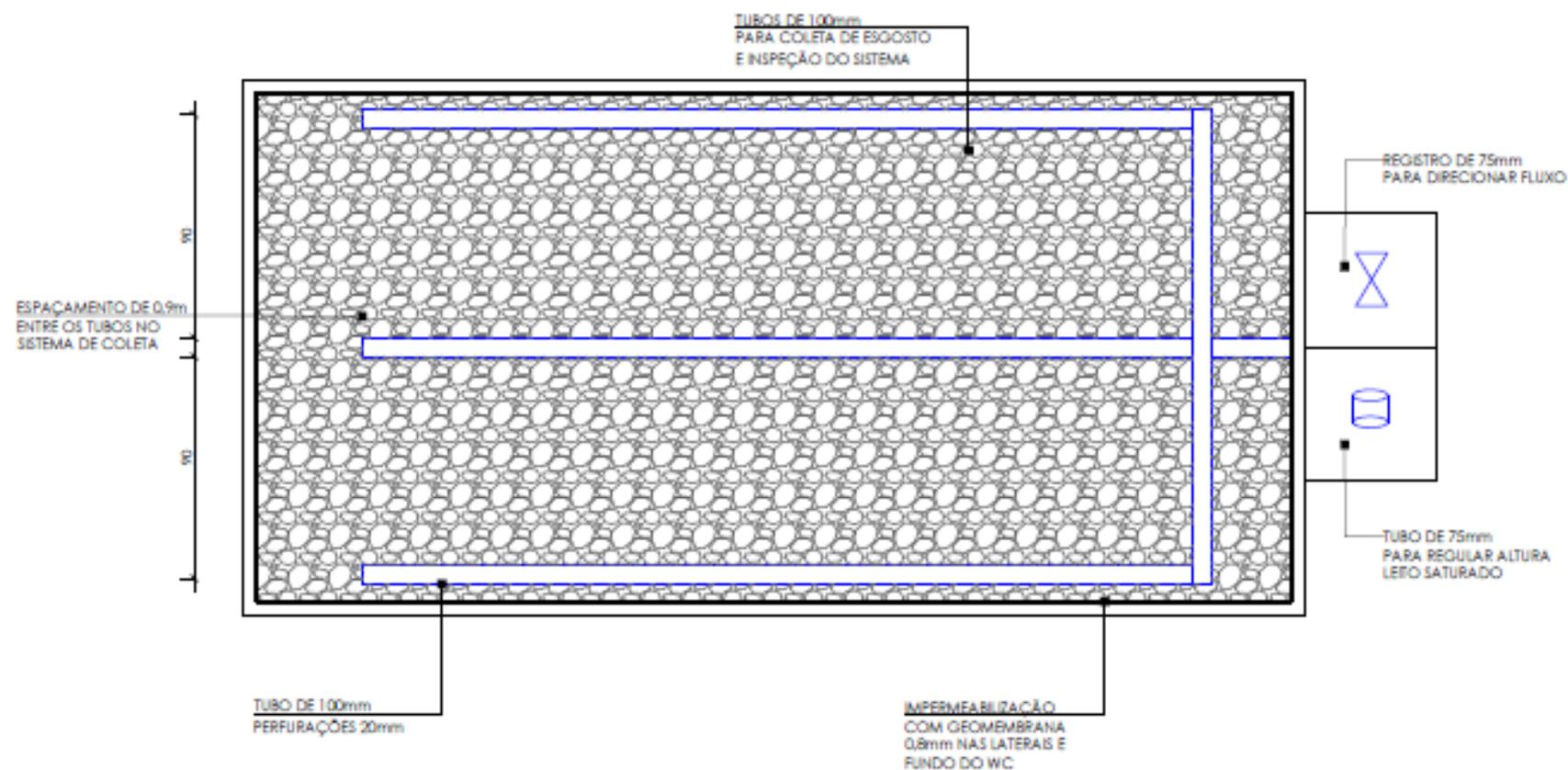
### VISTA SUPERIOR DO WC VERTICAL - distribuição do esgoto



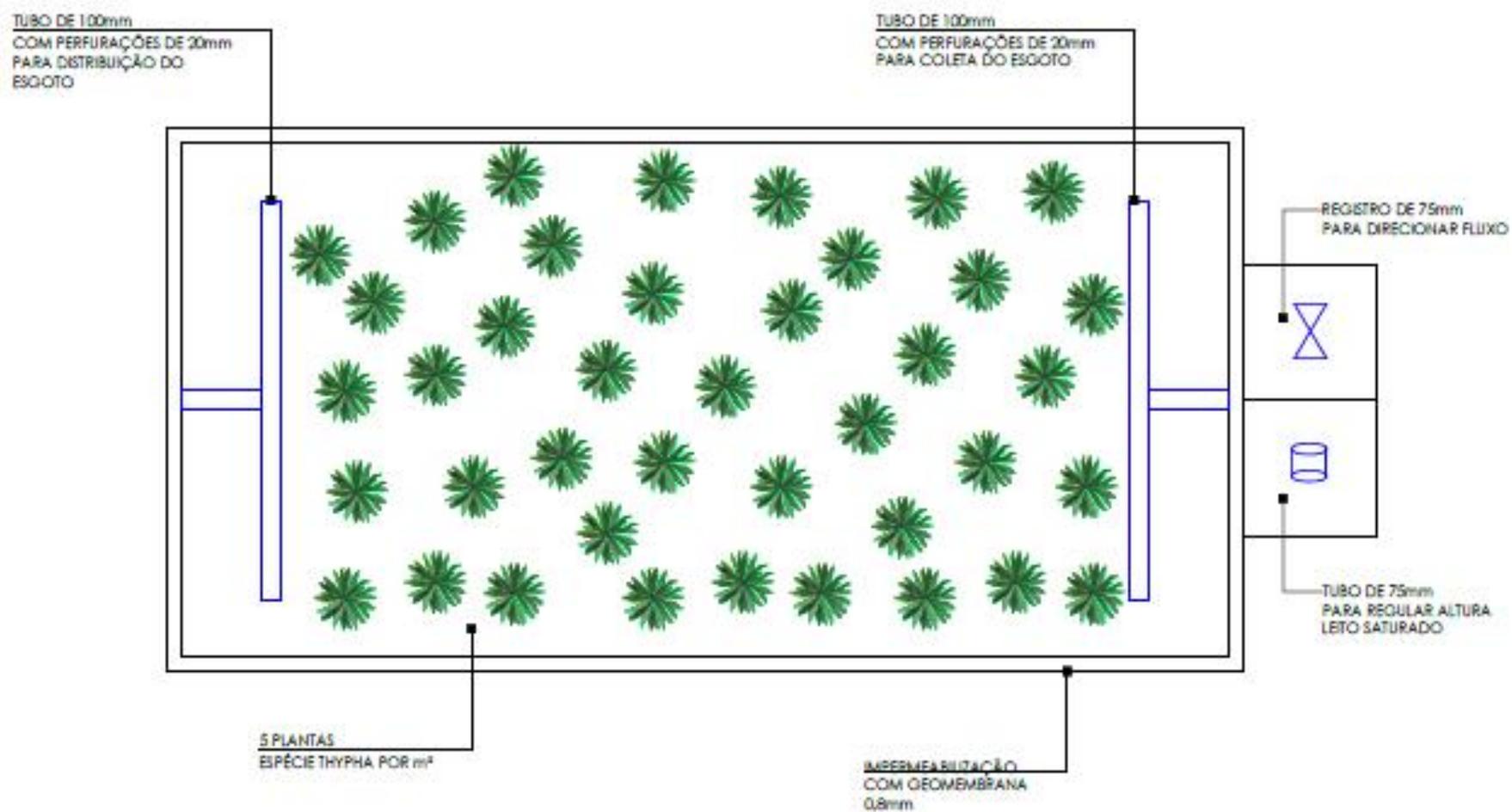
## VISTA LATERAL DO WC VERTICAL



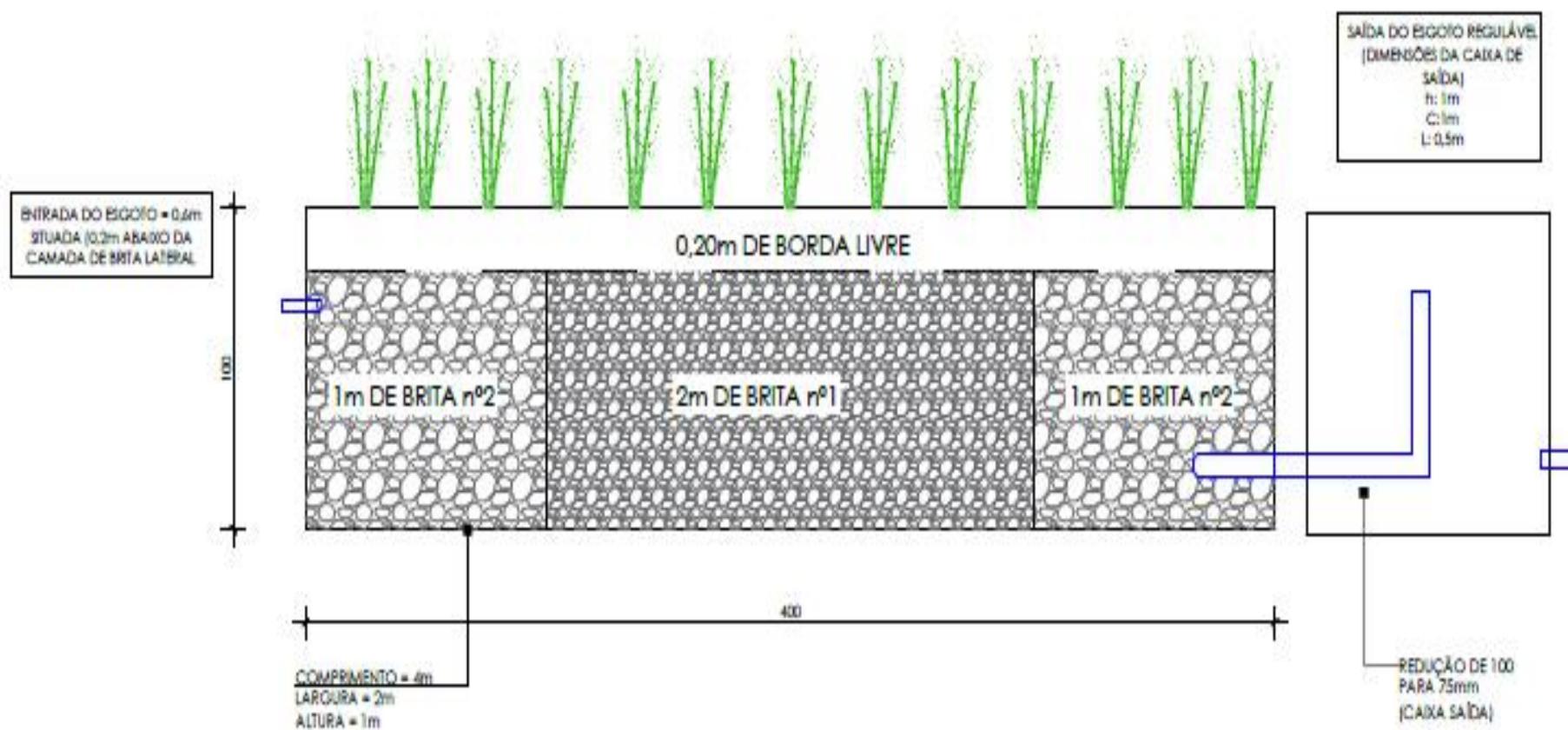
## VISTA SUPERIOR DO WC VERTICAL - coleta do esgoto



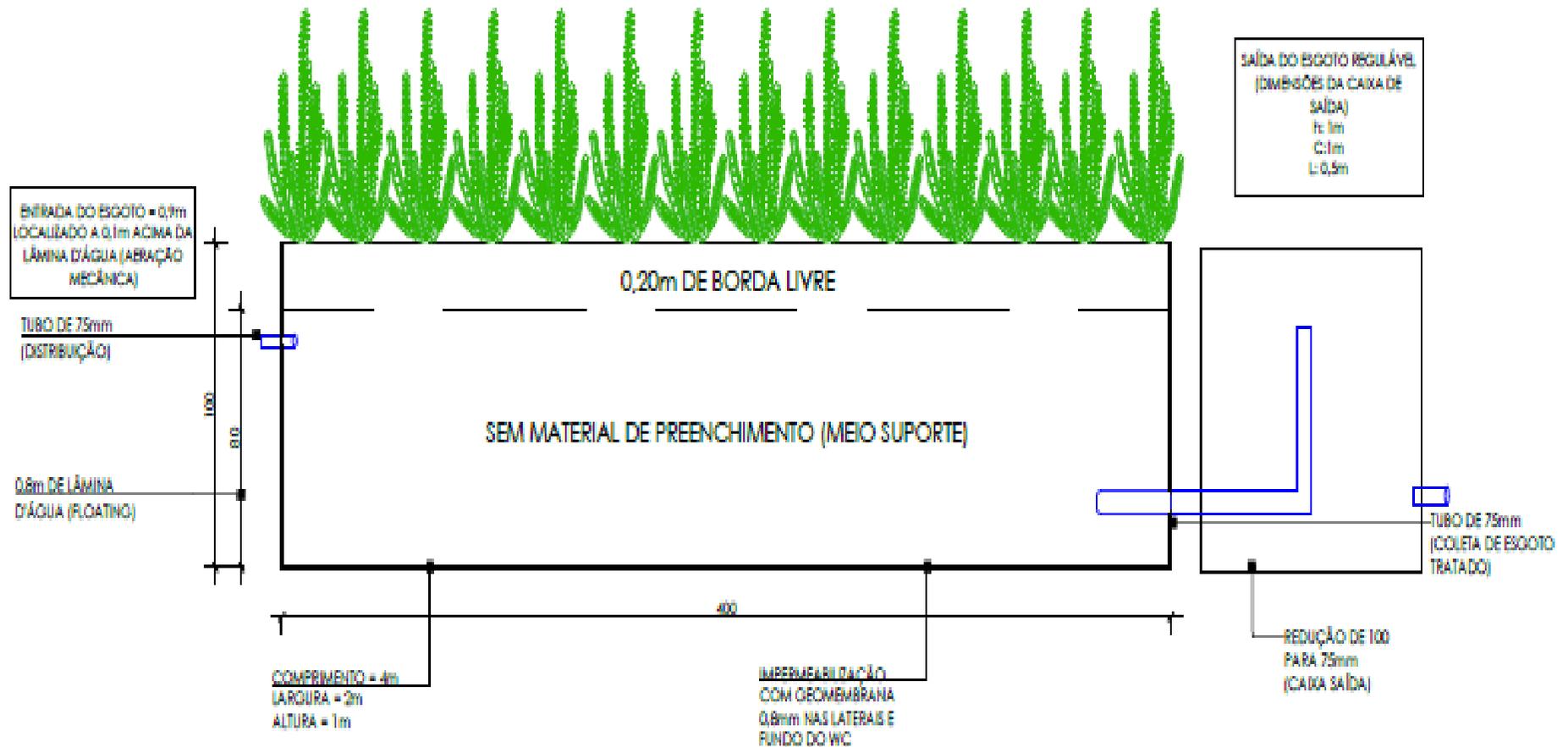
## VISTA SUPERIOR DO WC HORIZONTAL - distribuição e coleta do esgoto



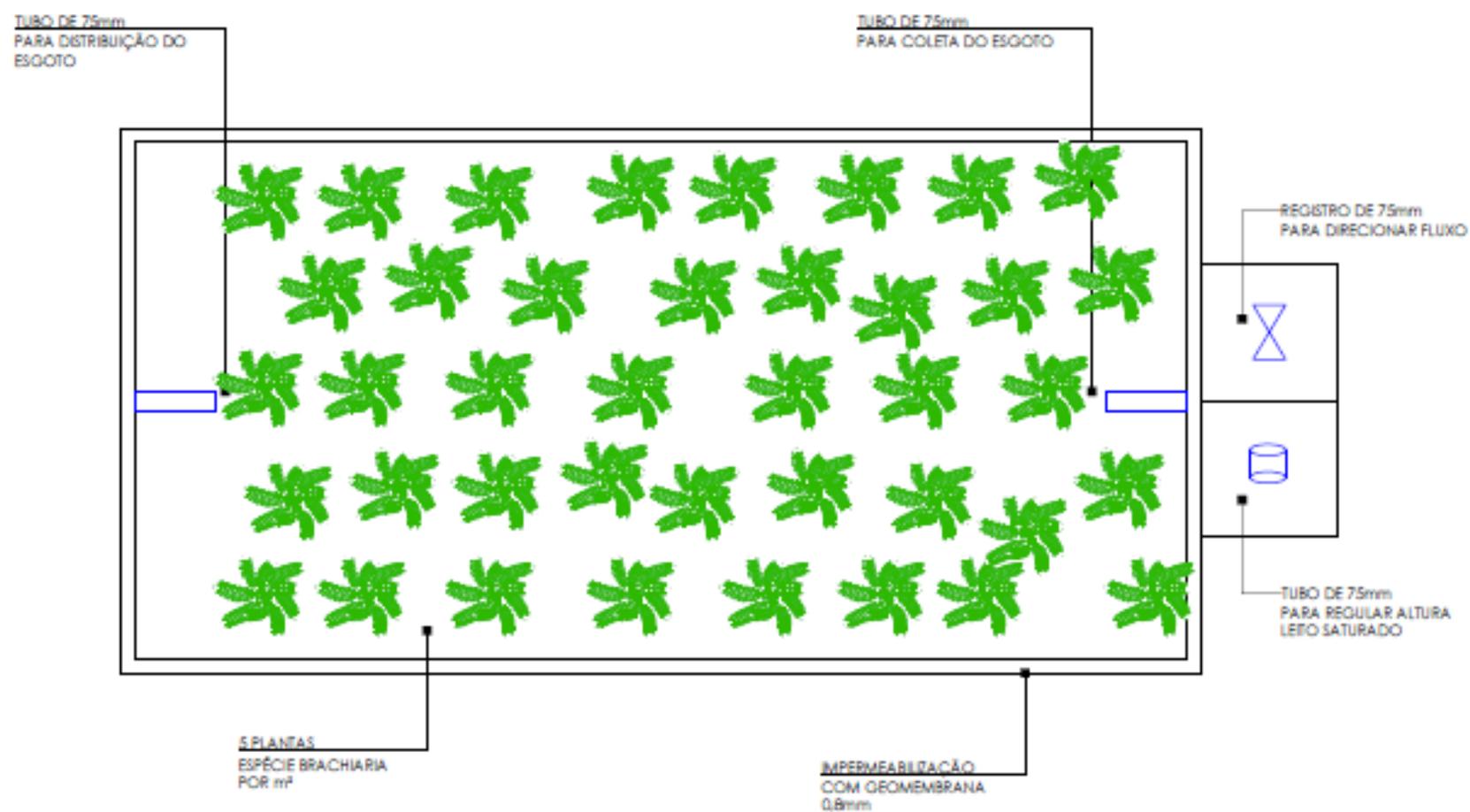
## VISTA LATERAL DO WC HORIZONTAL - distribuição e coleta do esgoto



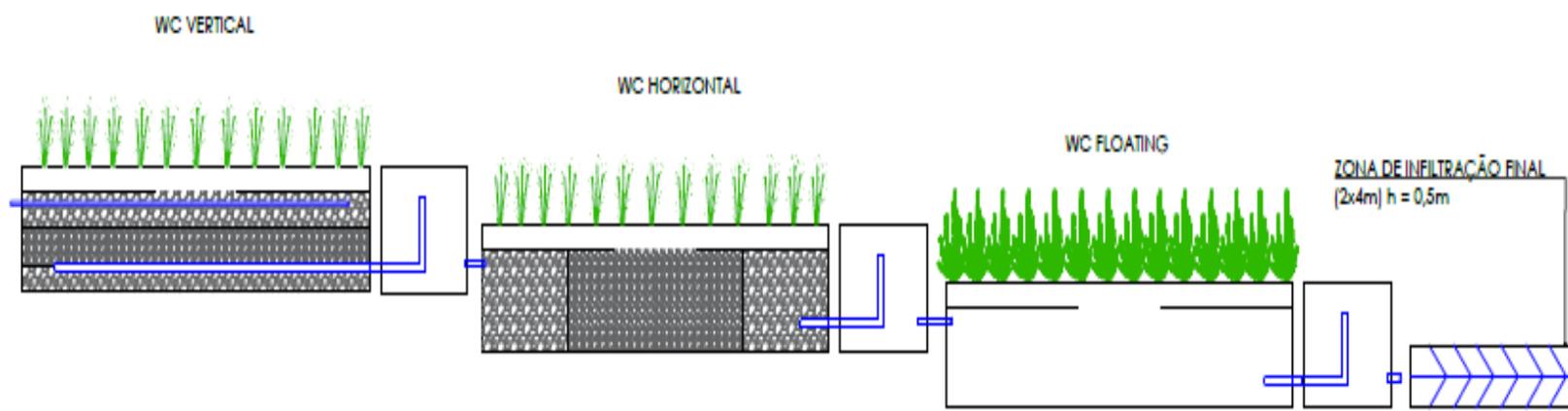
## VISTA LATERAL DO WC FLOATING - distribuição e coleta do esgoto



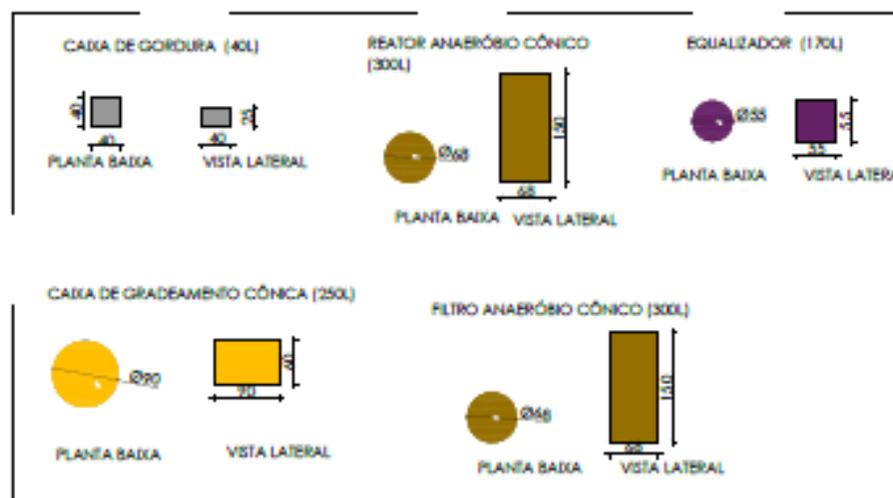
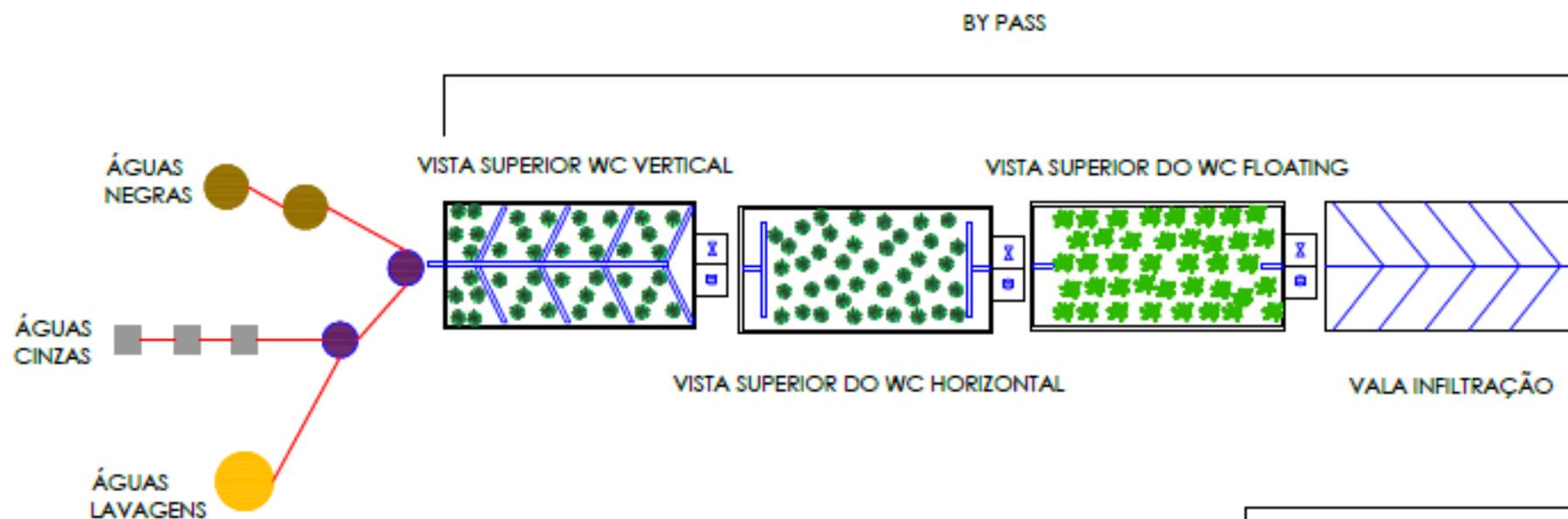
## VISTA SUPERIOR DO WC FLOATING - distribuição e coleta do esgoto



## VISTA LATERAL DO SISTEMA DE WC COMPLETO



DECLIVIDADE LONGITUDINAL DE FUNDO = 1%



#### TRATAMENTO PRELIMINAR

- Gradeamento
- Desarenador

#### TRATAMENTO PRIMÁRIO

- Tanque Séptico

#### TRATAMENTO SECUNDÁRIO

- Filtro Anaeróbio

## ANEXO B - CONFIGURAÇÕES DA ETE UNIFAMILIAR

### WC Vertical (WCVFSS)

| ITEM  | VALOR BOLETIM WETLANDS  | VALOR ADOTADO PROJETO  |
|---|---|------------------------|
| Altura da camada superior do meio suporte             | 0,05 a 0,10m  | <b>0,10m</b>           |
| Altura da camada de filtração                         | 0,40 a 0,60m  | <b>0,50m</b>           |
| Altura da camada de transição                         | 0,10m   | <b>0,10m</b>           |
| Altura da camada inferior de drenagem                 | 0,10m a 0,30m   | <b>0,10m</b>           |
| Borda livre   | 0,20 a 0,35m  | <b>0,20m</b>           |
| Número de unidades                                    | Múltiplas de 2  | <b>- não se aplica</b> |
| Área máxima de cada unidade                           | 400m <sup>2</sup>   | <b>8m<sup>2</sup></b>  |
| Inclinação das paredes ou taludes internos            | 0:1 a 2:1   | <b>0:1</b>             |
| Declividade de fundo                                  | 0 a 1%  | <b>1%</b>              |
| <b>LEITO FILTRANTE</b>                                |   |                        |
| Granulometria do leito na camada superior             | Brita, cascalho, escórias siderúrgicas ou outros materiais que possuam resistência física e que não sofram desagregação química ou biológica. Granulometria referenciada em termos de britagem: brita 0 (4,8 a 9,5mm) ou brita 1 (9,5 a 19mm) | <b>Brita 1</b>         |
| Granulometria do leito na camada de filtração         | Areia grossa (1,2 a 4,8mm)  | <b>Brita 1 e 2</b>     |
| Granulometria do leito na camada de transição         | Brita 0 (4,8 a 9,5mm)   | <b>Brita 1 e 2</b>     |
| Granulometria do leito na camada inferior de drenagem | Brita 0 (4,8 a 9,5mm) ou brita 1 (9,5 a 19mm)   | <b>Brita 1 e 2</b>     |
| <b>DETALHES HIDRÁULICOS E COSNTRUTIVOS</b>            |   |                        |

|   |   |   |
|---|---|---|
| Alternância entre os leitos                             | Variável de 3,5 a 30d   | Não se aplica   |
| Tipo de alimentação no leito em operação                | Intermitente  | Intermitente (a cada 2h ou menos)   |
| Frequência da dosagem do afluente                       | Bateladas a cada 2 ou 8h  | Batelada a cada 2h ou menos   |
| Entrada e distribuição do afluente                      | Tubulação de distribuição uniforme sobre toda área superficial da unidade WC. Diâmetro mínimo de 40mm com orifícios de perfurações superiores a 8mm. Um orifício a cada 1 ou 2m <sup>2</sup> de área.                                   | <b>DN 75mm (registros, flanges, conexões e tubulações) com orifícios perfurados de 12mm a 5cm de distância entre cada um deles.</b><br><b>DN 100mm (registros, flanges, conexões e tubulações) com orifícios perfurados de 12mm a 5cm de distância entre cada um deles. Na saída há redução de DN 100 para DN 75mm.</b> |
| Coleta e retirada do efluente                           | Sistema de drenagem com tubos de orifícios perfurados. Esse sistema deve aflorar na superfície permitindo entrada de ar e propiciando limpeza com jato limpa fossa..  |   |
| Impermeabilização do fundo e parede ou taludes internos | Utilização de materiais e métodos que garantam impermeabilização do fundo e das paredes (alvenaria ou concreto) ou taludes internos (solo) e que garantam a resistência mecânica e aos impactos da radiação solar (em locais expostos). | <b>Impermeabilização com geomembrana de 0,8mm em toda a área (fundo, lateral e ancoragem). Considerar a mesma área de geomembrana em geomanta Bidim®.</b>   |

**CRITÉRIOS E PARÂMETROS DE PROJETO EMPREGADOS NO WCVFSS**

| <b>ITEM</b>                                     | <b>WCVFSS RECEBENDO EFLUENTE PREVIAMENTE TRATADO</b>   | <b>VALOR ADOTADO PROJETO</b>  |
|---|--|---|
| Taxa de aplicação orgânica superficial máxima   | 10 a 20gDBO.m <sup>2</sup> .d <sup>-1</sup> . Valores mais reduzidos da taxa de aplicação orgânica superficial (dimensionamentos mais conservadores) conduzem a maiores áreas superficiais requeridas. | 10gDBO.m <sup>2</sup> .d <sup>-1</sup><br><b>Mesmo com afluente oriundo de tratamento secundário (baixa eficiência de 75%) o projeto é conservador em função das condições climáticas locais e da grande área disponível.</b> |
| Taxa de aplicação hidráulica superficial máxima | 0,05 a 0,12 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> . A área calculada é a área da parte superior do leito filtrante, e não a área do fundo ou a meia profundidade.                           | <b>0,12 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup></b>   |

| TIPOS DE TRATAMENTO A MONTANTE DO WCVFSS     |  |                                    |
|--|--|------------------------------------|
| ITEM   | WCVFSS APÓS TRATAMENTO PRIMÁRIO OU SECUNDÁRIO  | VALOR ADOTADO NO PROJETO           |
| Tratamento preliminar                        | Gradeamento e desarenação  | Caixas de gordura e de gradeamento |
| Tratamento primário ou secundário a montante | Tanques sépticos (variáveis configurações)<br>Exemplos: reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente; reatores anaeróbios compartimentados  | RAFA + FAFA                        |
| PLANTAS                                      |  |                                    |
| Plantas utilizadas e seu manejo              | <i>Typha dominguensis</i> (taboa). Outras espécies podem ser utilizadas, desde que se adaptem às condições operacionais impostas. As plantas devem ter um manejo adequado e sua remoção após o corte, evita a liberação dos compostos absorvidos e podendo ser encaminhado para compostagem. |                                    |

## WC Horizontal (WCHFSS)

| ITEM   | VALOR BOLETIM WETLANDS  | VALOR ADOTADO PROJETO   |
|--|---|---|
| Altura do meio suporte                                     | 0,50 a 0,90m  | <b>0,80m</b>  |
| Profundidade da lâmina de esgoto                           | 0,40 a 0,80m  | <b>variável entre 0,10 e 0,80m</b>  |
| Distância entre o nível do esgoto e o topo do meio suporte | 0,10m   | <b>variável entre 0,70 e 0m</b>   |
| Borda livre  | 0,10 a 0,20m  | <b>0,20m</b>  |
| Relação comprimento largura                                | 2:1 – 4:1   | 2:1   |
| Largura máxima de cada módulo                              | 30m   | <b>2m</b>   |
| Inclinação das paredes ou taludes internos                 | 0:1 a 2:1   | <b>0:1</b>  |
| Declividade de fundo                                       | 0 a 1%  | <b>1%</b>   |
| LEITO FILTRANTE  |   |   |
| Granulometria do leito                                     | Brita, cascalho, escórias siderúrgicas ou outros materiais que possuam resistência física e que não sofram desagregação química ou biológica. Granulometria referenciada em termos de britagem: brita 0 (4,8 a 9,5mm) ou brita 1 (9,5 a 19mm) | <b>Brita 1</b>  |
| Granulometria do leito nas zonas de entrada e saída        | Britagem correspondente a brita 4 (50 a 76 mm) ou pedra de mão (granulometria superior a 76 mm)   | <b>Brita 1 e 2</b>  |
| DETALHES HIDRÁULICOS E CONSTRUTIVOS                        |   |   |
| Entrada e distribuição do esgoto                           | O dimensionamento das tubulações deverá seguir cálculos hidráulicos. Para sistemas de pequeno porte, usualmente se utiliza tubulação de distribuição DN 100 mm com furos de 20 mm de diâmetro, espaçados a cada 10 cm.                        | <b>Entrada 75mm</b>   |
| Coleta e retirada do esgoto                                | Para sistemas de pequeno porte, a coleta do efluente é por tubulação de drenagem DN 100 mm perfurada com furos de 20 mm de diâmetro   | <b>Saída 100mm com redução em flanges de 75mm propiciando redução de custo. Perfurações de 20mm</b> |

|   |   |   |
|---|---|---|
|   | espaçados a cada 10 cm, cobrindo a largura da unidade ou módulo, e situada próximo ao fundo do <i>Wetland</i> .   |   |
| Impermeabilização do fundo e parede ou taludes internos | Utilização de materiais e métodos que garantam impermeabilização do fundo e das paredes (alvenaria ou concreto) ou taludes internos (solo) e que garantam a resistência mecânica e aos impactos da radiação solar (em locais expostos). | <b>Impermeabilização com geomembrana de 0,8mm em toda a área (fundo, lateral e ancoragem). Considerar a mesma área de geomembrana em geomanta Bidim®.</b> |

| ITEM  | WCHFSS RECEBENDO<br>EFLUENTE PREVIAMENTE TRATADO   | VALOR ADOTADO PROJETO   |
|---|--|---|
| Taxa de aplicação orgânica superficial máxima   | De 6 a 15gDBO.m <sup>2</sup> .d <sup>-1</sup> Valores mais reduzidos da taxa de aplicação orgânica superficial (dimensionamentos mais conservadores) conduzem a maiores áreas superficiais requeridas. A decisão do projetista deve levar em consideração, portanto, os requisitos de área e a expectativa com relação ao efluente final.  | <b>10gDBO.m<sup>2</sup>.d<sup>-1</sup><br/>Mesmo com afluente oriundo de WCVFSS (alta eficiência de remoção global) o projeto é conservador em função das condições climáticas e da grande área disponível.</b> |
| Taxa de aplicação hidráulica superficial máxima | Tratamento de efluente primário, como tanque séptico: 0,02 a 0,08 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> ou pós-tratamento de efluente secundário advindo de processo pouco eficiente: 0,04 a 0,12 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> A área calculada é a área da parte superior do leito filtrante, e não a área do fundo ou a meia profundidade. A área superficial requerida é o quociente entre a vazão afluente ao sistema e a taxa de aplicação hidráulica superficial adotada. | <b>0,12 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup></b>   |

#### TIPOS DE TRATAMENTO A MONTANTE DO WCHFSS

| ITEM   | WCHFSS APÓS TRATAMENTO<br>PRIMÁRIO OU SECUNDÁRIO  | VALOR ADOTADO NO PROJETO                  |
|--|---|---|
| Tratamento preliminar                        | Gradeamento e desarenação   | <b>Caixas de gordura e de gradeamento</b> |
| Tratamento primário ou secundário a montante | Tanques sépticos (variáveis configurações)<br>Exemplos: reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente; reatores anaeróbios compartimentados | <b>RAFA + FAFA + WCVFSS</b>               |

#### PLANTAS

Plantas utilizadas e seu manejo

*Typha dominguensis* (taboa). Outras espécies podem ser utilizadas, desde que se adaptem às condições operacionais impostas. As plantas devem ter um manejo adequado e sua remoção após o corte, evita a liberação dos compostos absorvidos e podendo ser encaminhado para compostagem.

---

*WC Floating (WCF)*

| <b>LAGOA COM</b>  |                                      |   |   |
|---|--------------------------------------|---|---|
| ITEM  | PLANTAS<br>AQUÁTICAS NBR             | WC MODELO FRANCÊS   | VALOR ADOTADO PROJETO   |
| Profundidade  | Variável                             | Variável  | <b>0,80m</b>  |
| Borda livre   | 0,30m                                | Entre 0,10 e 0,35m  | <b>0,20m</b>  |
| Relação comprimento largura                             | -                                    | -   | <b>2:1</b>  |
| Largura máxima  | 10m                                  | 30m   | <b>2m</b>   |
| Declividade do fundo                                    | 1%                                   | 1%  | <b>1%</b>   |
| Inclinação das paredes                                  | Variável                             | 0:1 a 2:1   | <b>0:1</b>  |
| <b>LEITO FILTRANTE</b>                                  |                                      |   |   |
| Granulometria do leito filtrante                        | Não há                               | Areia média ou grossa<br>(0,3 a 4,8 mm)   | <b>Não há</b>   |
| <b>DETALHES HIDRÁULICOS E CONSTRUTIVOS</b>              |                                      |   |   |
| Tipo de alimentação                                     | -                                    | Intermitente  | <b>Intermitente</b>   |
| Altura da camada de líquido                             | Profundidade máx.<br>entre 0,70 e 1m | -   | <b>0,80m</b>  |
| Entrada e distribuição do efluente                      | Variável                             | Tubulação de distribuição DN 75 mm  | <b>75mm</b>   |
| Coletada e retirada                                     | Variável                             | Sistema de drenagem no fundo, com tubulações de DN mínimo de 100 mm.  | <b>100mm com redução para 75mm</b>  |
| Impermeabilização do fundo e parede ou taludes internos | Escavação direto no solo             | Utilização de materiais e métodos que garantam impermeabilização do fundo e das paredes (alvenaria ou concreto) ou taludes internos (solo) e que garantam a resistência mecânica e aos impactos da radiação solar (em locais expostos). | <b>Impermeabilização com geomembrana de 0,8mm em toda a área (fundo, lateral e ancoragem). Considerar a mesma área de geomembrana em geomanta Bidim®.</b> |
| <b>LODO</b>   |                                      |   |   |
| Altura e remoção da camada de lodo                      | Recomenda remoção periódica          | Taxa de acúmulo de 1,5 a 3,0 cm/ano (segundo a experiência francesa). A   | <b>Será drenado quando o lodo atingir 2/3 do volume útil</b>  |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  | experiência brasileira, ainda que limitada, indicou valores próximos a 1,0 cm/ano nas unidades o 1º estágio.   |   |
|  | Intervalo de 10 a 20 anos de operação  |   |
| <b>CRITÉRIOS E PARÂMETROS DE PROJETO EMPREGADOS NO WCF</b> |  |   |
| Taxa de aplicação orgânica superficial máxima no leito     | Máxima 75 gDBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>  | 10 gDBO.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>              |
| Taxa de aplicação hidráulica superficial máxima no leito   | Tratamento de efluente primário, como tanque séptico: 0,02 a 0,08 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> ou pós-tratamento de efluente secundário advindo de processo pouco eficiente: 0,04 a 0,12 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>                                | 0,12 m <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> |
| <b>TIPOS DE TRATAMENTO A MONTANTE DO WCF</b>               |  |   |
| <b>ITEM</b>  | <b>WCFSS APÓS TRATAMENTO PRIMÁRIO OU SECUNDÁRIO</b>  | <b>VALOR ADOTADO NO PROJETO</b>                       |
| Tratamento preliminar                                      | Gradeamento e desarenação  | Caixas de gordura e de gradeamento                    |
| Tratamento primário ou secundário a montante               | Tanques sépticos (variáveis configurações)<br>Exemplos: reatores anaeróbios de manta de lodo e fluxo ascendente; reatores anaeróbios compartimentados  | RAFA + FAFA + WCVFSS                                  |
| <b>PLANTAS</b>   |  |   |
| Plantas utilizadas e seu manejo                            | <i>Typha dominguensis</i> (taboa). Outras espécies podem ser utilizadas, desde que se adaptem às condições operacionais impostas. As plantas devem ter um manejo adequado e sua remoção após o corte, evita a liberação dos compostos absorvidos e podendo ser encaminhado para compostagem. |   |