



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Gustavo Sozzeki Kretzer

**Soluções Baseadas na Natureza para Tratamento Descentralizado de Efluentes Líquidos
em Florianópolis:** percepção de especialistas, empresas e usuário.

Florianópolis

2024

Gustavo Sozzeki Kretzer

**Soluções Baseadas na Natureza para Tratamento Descentralizado de Efluentes Líquidos
em Florianópolis: percepção de especialistas, empresas e usuário.**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Paulo Belli Filho, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Kretzer, Gustavo Sozzeki

Soluções Baseadas na Natureza para Tratamento
Descentralizado de Efluentes Líquidos em Florianópolis :
percepção de especialistas, empresas e usuário / Gustavo
Sozzeki Kretzer ; orientador, Paulo Belli Filho, 2024.

97 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

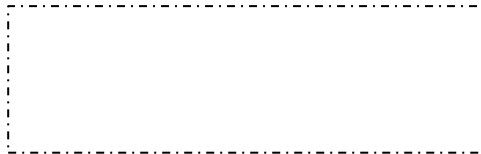
1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. soluções
baseadas na natureza. 3. tratamento de efluentes no lote.
4. wetlands. 5. benefícios ambientais. I. Belli Filho,
Paulo. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III.
Título.

Gustavo Sozzeki Kretzer

**Soluções Baseadas na Natureza para Tratamento Descentralizado de Efluentes Líquidos
em Florianópolis:** percepção de especialistas, empresas e usuário.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Sanitarista e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

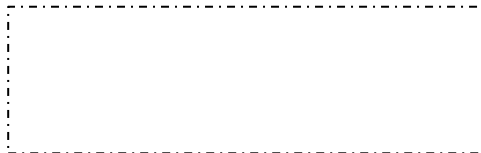
Florianópolis, 10 de dezembro de 2024.



Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.

Coordenação do Curso

Banca examinadora



Prof. Paulo Belli Filho, Dr.

Orientador



Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr.(a)

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. André Aguiar Battistelli, Dr.(a)

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pelo apoio ao longo de toda a minha trajetória acadêmica e de vida, e aos amigos que fiz na UFSC durante o curso.

Sou grato aos especialistas, empresas e organizações que participaram do estudo, que dedicaram seu tempo para contribuir com este trabalho e passar um pouco de suas experiências e conhecimentos: Pablo Heleno Sezerino, Vanessa, Heike Hoffmann, André Aguiar Battistelli, Catiane Pelissari, Gabriel Rodrigues Vasconcellos, Ênio Leandro Machado, aos colaboradores das empresas e ao usuário. Agradeço ao professor Paulo Belli, por sua orientação e ajuda com os contatos que tornaram este trabalho possível.

RESUMO

O trabalho aborda a aplicação de soluções baseadas na natureza (SBN) para o tratamento descentralizado de efluentes em Florianópolis/SC, destacando a percepção de especialistas, empresas e usuário. O estudo visa comparar tecnologias de SBN em relação à eficácia na remoção de poluentes, co-benefícios ambientais, analisar depoimentos e sintetizar os dados obtidos. A metodologia adotada no estudo combinou uma revisão bibliográfica e a coleta de depoimentos por meio de questionários qualitativos e quantitativos. A revisão bibliográfica abrange estudos de caso e dados sobre a aplicação de SBN em diferentes contextos. Já a coleta de depoimentos envolveu três grupos distintos: especialistas, empresas e usuários, e o uso de questionários permitiu uma análise diversificada, com a combinação de perguntas fechadas e abertas para compreender as experiências práticas e as percepções sobre a eficácia e os desafios dessas tecnologias no contexto local. Os resultados mostraram que as SBN, particularmente os wetlands construídos, são alternativas sustentáveis e eficazes para o tratamento de efluentes domésticos, demonstrando uma alta eficiência na remoção de matéria orgânica, como DBO e DQO, capacidade de reduzir os níveis de nutrientes como nitrogênio e fósforo, e retenção de sólidos suspensos totais. Essas tecnologias também se destacaram por sua baixa demanda energética, baixo custo operacional e simplicidade na manutenção, tornando-as mais acessíveis em comparação com sistemas tradicionais de tratamento. Além disso, os co-benefícios ambientais das SBN, como possibilidade de reúso do efluente tratado, ganhos em termos de biodiversidade e sequestro de carbono, são pontos importantes a serem analisados, visto que os wetlands desempenham funções além do tratamento de efluentes. Entre os desafios identificados, o principal é a barreira regulatória. A aceitação dessas tecnologias pode ser aumentada com políticas públicas de incentivo e conscientização sobre os co-benefícios, como biodiversidade e sequestro de carbono. O estudo mostra como as SBN vão além do tratamento de efluentes e reforça a importância para o saneamento básico.

Palavras-chave: soluções baseadas na natureza; wetlands; tratamento de efluentes no lote; co-benefícios ambientais.

ABSTRACT

The paper addresses the application of nature-based solutions (NBS) for the decentralized treatment of wastewater in Florianópolis/SC, highlighting the perceptions of experts, companies, and users. The study aims to compare NBS technologies in terms of their effectiveness in pollutant removal, environmental co-benefits, analyze testimonials, and synthesize the data obtained. The methodology adopted in the study combined a literature review and the collection of testimonials through qualitative and quantitative questionnaires. The literature review covered case studies and data on the application of NBS in different contexts. The testimonial collection involved three distinct groups: experts, companies, and users, and the use of questionnaires allowed for a diverse analysis, combining closed and open-ended questions to understand practical experiences and perceptions regarding the effectiveness and challenges of these technologies in the local context. The results showed that NBS, particularly constructed wetlands, are sustainable and effective alternatives for domestic wastewater treatment, demonstrating high efficiency in the removal of organic matter such as BOD and COD, the ability to reduce nutrient levels like nitrogen and phosphorus, and the retention of total suspended solids. These technologies also stood out for their low energy demand, low operational cost, and simplicity in maintenance, making them more accessible compared to traditional treatment systems. Additionally, the environmental co-benefits of NBS, such as the possibility of reusing treated effluent, biodiversity gains, and carbon sequestration, are important aspects to be considered, as wetlands perform functions beyond wastewater treatment. Among the identified challenges, the main one is the regulatory barrier. The acceptance of these technologies could be increased through public policies that promote awareness of the co-benefits, such as biodiversity and carbon sequestration. The study demonstrates how NBS go beyond wastewater treatment and emphasizes their importance for basic sanitation.

Keywords: nature-based solutions; wetlands; on-site wastewater treatment; environmental co-benefits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de wetlands de fluxo vertical	21
Figura 2 - Esquema de wetlands de fluxo vertical francês	22
Figura 3 - Esquema de wetlands de fluxo horizontal	23
Figura 4 - Esquema de wetlands de superfície de água livre	24
Figura 5 - Esquema de wetlands para lodo.....	25
Figura 6 - Esquema de wetlands aerados	26
Figura 7 - Bauer Nimr Water Treatment Plant.....	37
Figura 8 - Esquema de wetlands de fluxo vertical presente na NBR 17076	40
Figura 9 - Águas residuais tratadas por wetlands de fluxo vertical.....	50
Figura 10 - Águas residuais tratadas por wetlands de fluxo vertical francês	50
Figura 11 - Águas residuais tratadas por wetlands de fluxo horizontal.....	50
Figura 12 - Águas residuais tratadas por wetlands mecanicamente aerados	50
Figura 13 - Águas residuais tratadas por wetlands de superfície de água livre.....	50
Figura 14 - Requisito de tamanho por população equivalente por SBN	53
Figura 15 - Eficiência na remoção de DQO por SBN	54
Figura 16 - Eficiência na remoção de DBO por SBN	55
Figura 17 - Eficiência na remoção de nitrogênio total por SBN	56
Figura 18 - Eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal (NH ₄ -N) por SBN.....	57
Figura 19 - Eficiência na remoção de fósforo total por SBN	58
Figura 20 - Eficiência na remoção de sólidos suspensos totais por SBN.....	59
Figura 21 - Co-benefícios dos wetlands de fluxo vertical	63
Figura 22 - Co-benefícios dos wetlands de fluxo vertical francês	63
Figura 23 - Co-benefícios dos wetlands de fluxo h. horizontal.....	63
Figura 24 - Co-benefícios dos wetlands aerados	63
Figura 25 - Co-benefícios dos wetlands de superfície de água livre	63
Figura 26 - Co-benefícios dos canteiros de tratamento de lodo	63
Figura 27 - Wetlands construídos para tratamento de águas cinzas	72
Figura 28 - Wetlands francês para tratamento de efluente bruto.....	72
Figura 29 - Wetlands construídos	74
Figura 30 - Mapa dos locais de estudo	76
Figura 31 - Principal benefício dos SBN em comparação com sistemas convencionais	78
Figura 32 - Desafios das SBN com aceitação e implementação	79

Figura 33 - Fatores que limitam o reuso de efluentes tratados por SBN.....	80
Figura 34 - Políticas públicas podem evoluir para incentivar a adoção de SBN.....	81
Figura 35 – Houve benefício econômico ou reputacional?	82
Figura 36 - Faz o reuso de efluente tratado?	82
Figura 37 - Atendeu as expectativas?	82
Figura 38 – Tiveram desafios de implantação ou manutenção?.....	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Nome das tecnologias baseadas na natureza para tratamento de efluentes.....	28
Quadro 2 - Tipos de águas residuais recomendadas a serem tratadas pelas diferentes SBN ...	29
Quadro 3 - Eficiência de tratamento com diferentes SBN	30
Quadro 4 - Co-benefícios das diferentes SBN.....	32
Quadro 5 - Tipos de águas residuais recomendadas a serem tratadas pelas SBN selecionadas	49
Quadro 6 - Eficiência de tratamento pelas SBN selecionadas.....	52
Quadro 7 - Co-benefícios das SBN selecionadas	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APP	Área de Preservação Permanente
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
IWA	International Water Association
NBR	Norma Brasileira
NH ₄ -N	Nitrogênio Amoniacal
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
SBN	Soluções Baseada na Natureza / Sistemas Baseados na Natureza
SST	Sólidos Suspensos Totais

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	OBJETIVOS	17
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1.	CONCEITO DE SOLUÇÕES BASEADOS NA NATUREZA (SBN).....	18
3.2.	CONTEXTUALIZAÇÃO	18
3.3.	EXEMPLOS DE SBN PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	19
3.3.1.	Wetlands de fluxo vertical	19
3.3.2.	Wetlands de fluxo vertical francês.....	21
3.3.3.	Wetlands de fluxo horizontal	22
3.3.4.	Wetlands de superfície de água livre	23
3.3.5.	Wetlands para lodo	24
3.3.6.	Wetlands aerados	25
3.4.	TIPOS DE SBN E SUAS CARACTERÍSTICAS.....	26
3.5.	FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DAS SBN	34
3.5.1.	Fatores climáticos	34
3.5.2.	Solo e geologia.....	35
3.5.3.	Fatores biológicos	35
3.5.4.	Características das águas residuais	35
3.5.5.	Operação e manutenção.....	36
3.6.	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	36
3.6.1.	Ao redor do mundo	36
3.6.2.	Santa Catarina.....	37
3.7.	CUSTOS E VIABILIDADE	38
3.7.1.	Custos de implantação	38
3.7.2.	Custos de operação	38
3.7.3.	Viabilidade e vantagem econômica.....	39
3.8.	LEGISLAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS.....	39
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1.	COMPARAÇÕES DE SBN	41
4.1.1.	Coleta de dados de SBN	41

4.1.1.1.	<i>Procedimento utilizado.....</i>	41
4.1.1.2.	<i>Crêterios de seleção das tecnologias.....</i>	41
4.1.2.	Análise de dados para comparação de SBN.....	42
4.2.	DEPOIMENTOS.....	42
4.2.1.	Coleta de dados e depoimentos	42
4.2.1.1.	<i>Tipo de pesquisa.....</i>	43
4.2.1.2.	<i>Definição das amostras.....</i>	43
4.2.1.3.	<i>Métodos de coleta.....</i>	43
4.2.1.4.	<i>Aspectos �ticos</i>	44
4.2.2.	Análise de dados e depoimentos.....	44
4.2.2.1.	<i>Métodos de análise.....</i>	44
4.2.2.2.	<i>Limitações da metodologia</i>	44
4.2.3.	Questionários	44
4.2.3.1.	<i>Questionário para especialistas.....</i>	44
4.2.3.2.	<i>Questionário para empresas</i>	45
4.2.3.3.	<i>Questionário para usuário</i>	46
4.3.	SINTETIZAÇÃO DOS DADOS	47
4.3.1.	Compilação de dados.....	47
4.3.2.	Análise e interpretação dos resultados	47
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1.	COMPARAÇÃO DE SBN PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS	49
5.1.1.	Tipos de �guas Residuais Tratáveis pelas SBN.....	49
5.1.2.	Eficiência de tratamento	51
5.1.3.	Co-benefícios das SBN	60
5.1.4.	Discussão	64
5.2.	RESPOSTAS E DEPOIMENTOS	64
5.2.1.	Especialistas	64
5.2.1.1.	<i>Pablo Heleno Sezerino - Especialista em tratamento de efluentes</i>	64
5.2.1.2.	<i>Vanessa - Especialista em vigilância em saúde e em saúde ambiental</i>	65
5.2.1.3.	<i>Heike Hoffmann – Especialista em saneamento sustentável e processo de tratamentos</i>	66
5.2.1.4.	<i>André Aguiar Battistelli - Especialista em tratamento de efluentes</i>	67
5.2.1.5.	<i>Catiane Pelissari - Especialista em tratamento descentralizado de esgoto</i>	68

5.2.1.6. <i>Gabriel Rodrigues Vasconcellos - Especialista em saneamento e wetlands</i> <i>construídos</i>	68
5.2.1.7. <i>Ênio Leandro Machado - Especialista em tratamento de efluentes, tecnologias</i> <i>limpas e análise/avaliação do ciclo de vida</i>	69
5.2.2. Empresas	70
5.2.2.1. <i>Empresa 1</i>	70
5.2.2.2. <i>Empresa 2</i>	70
5.2.2.3. <i>Empresa 3</i>	73
5.2.2.4. <i>Empresa 4</i>	74
5.2.3. Usuário	75
5.3. SINTETIZAÇÃO DOS DADOS COLETADOS	75
5.3.1. Locais de estudo	75
5.3.2. Relevância dos dados	77
5.3.3. Sintetização das respostas	77
5.3.3.1. <i>Especialistas</i>	77
5.3.3.2. <i>Empresas</i>	81
5.3.3.3. <i>Usuário</i>	83
6. CONCLUSÃO	84
REFERÊNCIAS	86
ANEXO A – QUESTIONÁRIOS	92

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a gestão dos efluentes impostos pela degradação ambiental, tem demandado o desenvolvimento de soluções sustentáveis para o tratamento de esgoto. Entre essas, as Soluções Baseadas na Natureza (SBN), ou também chamado por Sistemas Baseados na Natureza, emergem como uma alternativa promissora para o tratamento descentralizado de efluentes (CAGECE, 2021). Esses sistemas utilizam processos naturais, como a interação entre plantas, microrganismos e solo, para tratar águas residuais de forma eficiente, sustentável e com baixo impacto ambiental (CROSS *et al.*, 2021). As SBN são cada vez mais reconhecidas como alternativas adequadas para a gestão dos efluentes, sendo descrito pela International Union for Conservation of Nature (IUCN) como solução que visa “proteger, gerenciar de maneira sustentável e recuperar ecossistemas naturais ou modificados [...] promovendo o bem-estar humano e os benefícios da biodiversidade” (COHEN-SHACHAM *et al.*, 2016).

As SBN têm se espalhado pelo Brasil, e sua capacidade de se adaptar a diferentes realidades, tanto no campo quanto na cidade (SELEGUIM, 2024), representa uma alternativa prática para o tratamento secundário de efluentes domésticos em áreas que não contam com rede de esgoto.

Em Florianópolis/SC, essa ideia vem se tornando realidade, especialmente porque a cidade precisa conciliar o progresso econômico com a conservação da natureza. Afinal, diversas partes do seu território são compostas por áreas de preservação permanente (APP). Neste contexto, as SBN aparecem como uma opção viável e sustentável. Essas soluções vêm sendo estudadas e avaliadas como alternativas reais, proporcionando a melhoria da qualidade do tratamento de efluentes e promovendo a conservação da biodiversidade local e a resiliência ambiental da cidade frente às mudanças climáticas (MANES *et al.*, 2022).

Essas soluções possuem uma grande relevância para a gestão sustentável da água em Florianópolis/SC, visto que é uma solução prática e eficiente para o tratamento descentralizado de efluentes no lote, sendo importante haver formas para lidar com diferentes características de projeto encontrados no município. Sua consolidação e difusão são os passos necessários para a universalização do saneamento básico (SEZERINO *et al.*, 2018).

Algumas tecnologias já estão estabelecidas e em uso em algumas propriedades privadas de Florianópolis, como os wetlands construídos de fluxo horizontal com macrófitas para ajudar na remoção de poluentes em águas residuais. Estes podem remover até 65% da DBO, 80% da DQO, 50% do fósforo e 40% do nitrogênio total nos efluentes (CROSS *et al.*, 2021), os wetlands verticais também vêm sendo empregados, com capacidade de remover até 83% da

DBO, 90% da DQO, 35% do fósforo e 40% do nitrogênio total nos efluentes (CROSS *et al.*, 2021).

Os wetlands construídos de escoamento subsuperficial horizontal emergiram na década de 1990 como uma das primeiras opções de tratamento secundário para esgoto doméstico, após a passagem pelo tanque séptico. Essa tecnologia ganhou força, especialmente, nas áreas rurais de Santa Catarina, com um papel de destaque e pioneirismo neste desenvolvimento. Foi a colaboração entre extensionistas da Epagri e o professor Luiz Sérgio Philipp que contribuíram para a expansão desta prática para a região, trazendo um novo olhar sobre como lidar com a água e os efluentes (SEZERINO; PELISSARI, 2021).

A presente pesquisa justifica-se identificando os principais pontos observados por especialistas sobre as dificuldades na ampliação do uso de SBN, e explorara como essas soluções podem ser promovidas de maneira mais efetiva. De forma complementar, busca-se compreender os resultados empresariais, analisando suas perspectivas e possíveis desafios enfrentados no desenvolvimento e aplicação dessas tecnologias.

O desenvolvimento e a implantação das SBN são importantes para a sustentabilidade, e o presente trabalho explora as tecnologias existentes, depoimentos de especialistas, empresas e usuário, para discutir sobre a implantação de uma medida mais sustentável, e posteriormente, apresentar uma sintetização dos dados das SBN para tratamento de efluentes descentralizados em Florianópolis/SC.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Identificar a aplicabilidade de Soluções Baseadas na Natureza no tratamento de esgoto no lote a partir de diferentes percepções.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Comparar diferentes tecnologias de SBN para tratamento de efluentes domésticos no lote, avaliando a eficiência de remoção de poluentes;
2. Coletar depoimentos sobre soluções baseadas na natureza para tratamento de efluentes por parte de especialistas, empresas e usuário;
3. Sintetizar os dados coletados a partir das percepções de especialistas, empresas e usuários sobre os sistemas SBN.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CONCEITO DE SOLUÇÕES BASEADOS NA NATUREZA (SBN)

De acordo com o livro publicado pela International Union for Conservation of Nature (IUCN), de Cohen-Shacham *et al.* (2016), o conceito de SBN é definido como:

“[...] ações para proteger, gerenciar de forma sustentável e restaurar ecossistemas naturais ou modificados, que abordam desafios sociais (por exemplo, mudanças climáticas, segurança alimentar e hídrica ou desastres naturais) de forma eficaz e adaptável, ao mesmo tempo em que fornecem bem-estar humano e benefícios à biodiversidade” (Cohen-Shacham *et al.*, 2016).

A International Water Association (IWA) diz que o investimento em SBN está se tornando cada vez mais visto como uma forma de lidar com os desafios locais da água em ambientes urbanos e rurais, como inundações, escassez de suprimentos, uso mais sustentável dos recursos ou degradação da qualidade da água, tudo isso de uma forma baseada na natureza.

3.2. CONTEXTUALIZAÇÃO

Atualmente, 26% da população mundial, cerca de 2 bilhões de pessoas, não têm acesso à água potável, enquanto 46% dos habitantes, aproximadamente 3,6 bilhões de pessoas, não possuem serviços de saneamento seguros (ONU, 2023). A IWA também afirma que, com a degradação acelerada dos ecossistemas aquáticos, 66% da população mundial poderão enfrentar condições de escassez de água até 2025. Portanto, há uma tendência a aumentar a escassez hídrica, reforçando a importância no desenvolvimento e implementação de novas tecnologias e soluções para o saneamento.

Em Santa Catarina, apenas 40,83% da população tem acesso aos serviços de esgotamento sanitário (SNIS, 2021), enquanto 53,54% utilizam fossas sépticas para tratar as águas residuais (IBGE, 2024), o que evidencia a importância desse método de tratamento no estado. Enquanto que, para Florianópolis, 65,71% da população conta com serviços de esgotamento sanitário (SNIS, 2021), e os 34,29% restantes utilizam tratamentos no lote ou não possuem tratamento adequado, por isso se faz necessário o estudo e implantação de soluções que sejam eficientes e capazes de tratar o efluente sem gerar danos ao meio ambiente.

A ONU (2020) ressalta que, atualmente, mais da metade da população mundial não tem acesso a esgoto tratado, e essa realidade resulta em consequências trágicas, com mais de 800

crianças perdendo a vida, diariamente, devido a doenças como diarreia e infecções relacionadas à falta de saneamento e à água contaminada. As metas contempladas no ODS 6, referente ao acesso universal à água e saneamento até 2030, são urgentes, pois garantir saneamento adequado é essencial para a saúde humana.

Segundo o livro publicado pela IWA, *Nature Based Solutions for Wastewater Treatment*, as SBN podem ser integradas a sistemas de tratamento de águas cinzas, ou efluentes domésticos, agrícolas, industriais, lixiviados e águas pluviais. O objetivo principal do uso de SBN no tratamento de águas residuais é desenvolver sistemas que recriam e aproveitam os processos de depuração de ecossistemas naturais, oferecendo uma solução mais acessível, de baixa demanda energética e operação simplificada (STEFANAKIS *et al.*, 2014).

3.3. EXEMPLOS DE SBN PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES

Um dos exemplos mais estudados de SBN para tratamento secundário de efluente, são os wetlands construídos, também conhecidos por zonas de raízes. Este sistema utiliza plantas, solo, bactérias e outros componentes naturais para remover poluentes das águas residuais, incluindo sólidos suspensos, matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e patógenos (KADLEC; WALLACE, 2009), podendo ser classificados em dois principais tipos: naturais e construídos (WETLANDS BLOG, 2023b).

Os wetlands naturais são ecossistemas já existentes na natureza, como pântanos, brejos, planícies de inundação e manguezais, possuindo um importante papel no tratamento das águas, na retenção de poluentes e na filtragem natural dos contaminantes (PEREIRA, LIMA E SENA, 2022). Já os wetlands construídos são sistemas projetados para replicar os processos naturais encontrados nesses ecossistemas, otimizando o tratamento de poluentes. Dentre os wetlands construídos, há segmentações que são definidas de acordo com as variantes que cada modelo possui, como: tipo de efluente, sentido do fluxo de escoamento, aeração parcial, regime de alimentação, entre outros (SILVA *et al.*, 2022).

Os tipos de wetlands mais frequentemente utilizados possuem diferentes configurações para atender diferentes necessidades de tratamento de efluentes. Entre os mais comuns estão:

3.3.1. Wetlands de fluxo vertical

Os wetlands de fluxo vertical recebem um efluente vindo do tratamento primário para remover sólidos maiores (CROSS *et al.*, 2021), operando em regime intermitente, onde o

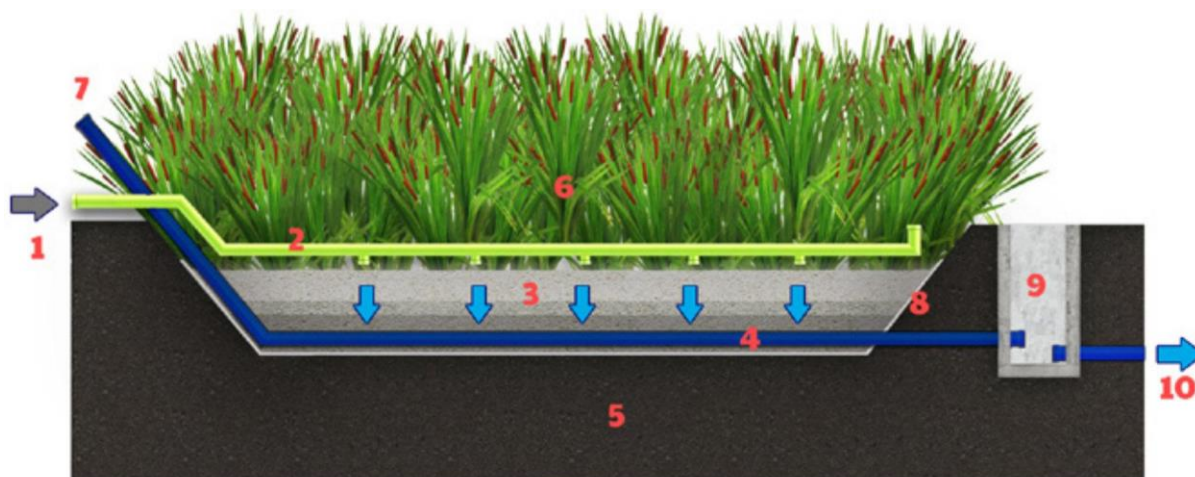
efluente é aplicado uniformemente em toda área superficial para percolar verticalmente com fluxo descendente até que seja drenado no fundo, e o ar presente no meio não saturado possibilita o processo de degradação aeróbica (VON SPERLING; SEZERINO, 2018). Dadas estas condições, os wetlands verticais conseguem remover cerca de 83% da DBO e 70 a 90% da DQO (LANGERGRABER, 2021), apresentando alta eficiência na degradação de matéria orgânica.

Um diferencial importante desses sistemas é sua eficácia na remoção de amônia (NH_4^+), podendo chegar até 90% de eficiência de tratamento (LANGERGRABER, 2021), devido à absorção dos nutrientes pelas macrófitas, e às altas concentrações de oxigênio, que são os substratos necessários para os microrganismos aeróbios, responsáveis pela nitrificação. Já nas zonas com menos oxigênio, os microrganismos anaeróbios fazem a degradação do nitrato em nitrogênio gasoso, completando assim o ciclo do nitrogênio e retirando-o do sistema (BORTOLI *et al.*, 2012).

Estes sistemas apresentam benefícios em relação a outras tecnologias de SBN. Um dos principais é a diminuição da necessidade de espaço, em relação aos sistemas de fluxo horizontal, tornando-o uma solução mais compacta. Os wetlands de fluxo vertical têm um risco menor de entupimento em relação aos wetlands de fluxo horizontal, o que possibilita uma operação mais contínua, baixo consumo de energia elétrica, já que podem ser alimentados por gravidade, não oferecem perigo de proliferação de mosquitos e lidam bem com flutuações na carga de efluentes. Trata-se de uma solução que pode ser implementada tanto em redes de esgoto separadas quanto combinadas, e existe a possibilidade de reutilização da água tratada, seja para descargas de sanitários, lavagem de calçadas ou irrigação (LANGERGRABER, 2021).

O esquema de funcionamento dos wetlands de fluxo vertical pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Esquema de wetlands de fluxo vertical



1 - Entrada; 2 - Sistema de alimentação; 3 - Camadas de diferentes tamanhos de meios porosos; 4 - Sistema de drenagem; 5 - Solo original; 6 - Plantas; 7 - Chaminé de aeração; 8 - Revestimento impermeável; 9 - Poço de Visita; 10 - Saída.

Fonte: Adaptado de Langergraber., 2021.

3.3.2. Wetlands de fluxo vertical francês

Embora o uso de wetlands de fluxo vertical francês seja com poucos números de estações no Brasil, já foi demonstrado sua capacidade em pequenas comunidades, com populações entre 100 e 1000 habitantes (VON SPERLING; SEZERINO, 2018).

Este sistema é reconhecido por sua eficiência no tratamento de águas residuais e que não precisa de um tratamento primário. Essa configuração consiste em dois estágios verticais sucessivos com meios filtrantes distintos. O primeiro estágio é projetado para receber esgoto bruto, sendo responsável por remover sólidos suspensos e matéria orgânica, e realizar a nitrificação parcial do nitrogênio amoniacal, enquanto o segundo estágio funciona como uma etapa de polimento, complementando a remoção de matéria orgânica e promovendo maior eficiência na nitrificação (TONDERA; RIZZO; MOLLE, 2021).

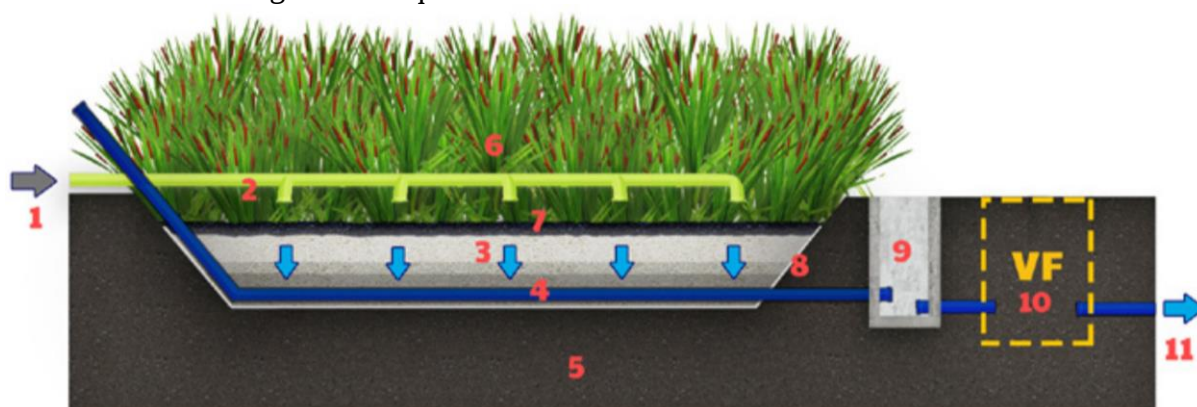
Uma outra característica do sistema francês é sua operação alternada entre períodos de alimentação e descanso. No primeiro estágio, uma unidade fica em operação, enquanto outra unidade permanece em repouso. Esse ciclo permite que o lodo acumulado na superfície do leito seque e sofra mineralização, formando uma camada que melhora o processo de filtração. A cada aplicação de efluente bruto, o meio filtrante permanece não saturado, mantendo espaços preenchidos com ar, criando condições aeróbias para a degradação dos poluentes (VON SPERLING; SEZERINO, 2018).

Outras vantagens incluem o baixo risco para a proliferação de mosquitos, ausência de maus odores, menor risco de entupimento em comparação com wetlands horizontais, e também baixo consumo energético, especialmente quando a alimentação ocorre por gravidade. O sistema tem potencial de reutilização do efluente tratado para fins não potáveis, e é possível obter um produto final de alta qualidade do lodo, adequado para fertilizantes (TONDERA; RIZZO; MOLLE, 2021).

Uma desvantagem é a necessidade de componentes mecânicos para o sistema de alimentação, o que pode aumentar a complexidade na operação e o custo de manutenção (TONDERA; RIZZO; MOLLE, 2021).

O esquema de funcionamento dos wetlands de fluxo vertical francês pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de wetlands de fluxo vertical francês



1 - Entrada; 2 - Sistema de alimentação; 3 - Meio poroso; 4 - Sistema de drenagem; 5 - Solo original; 6 - Plantas; 7 - Camada de lodo; 8 - Revestimento impermeável; 9 - Poço de Visita; 10 - Segundo estágio de fluxo vertical; 11 - Saída.

Fonte: Adaptado de Tondera; Rizzo; Molle, 2021.

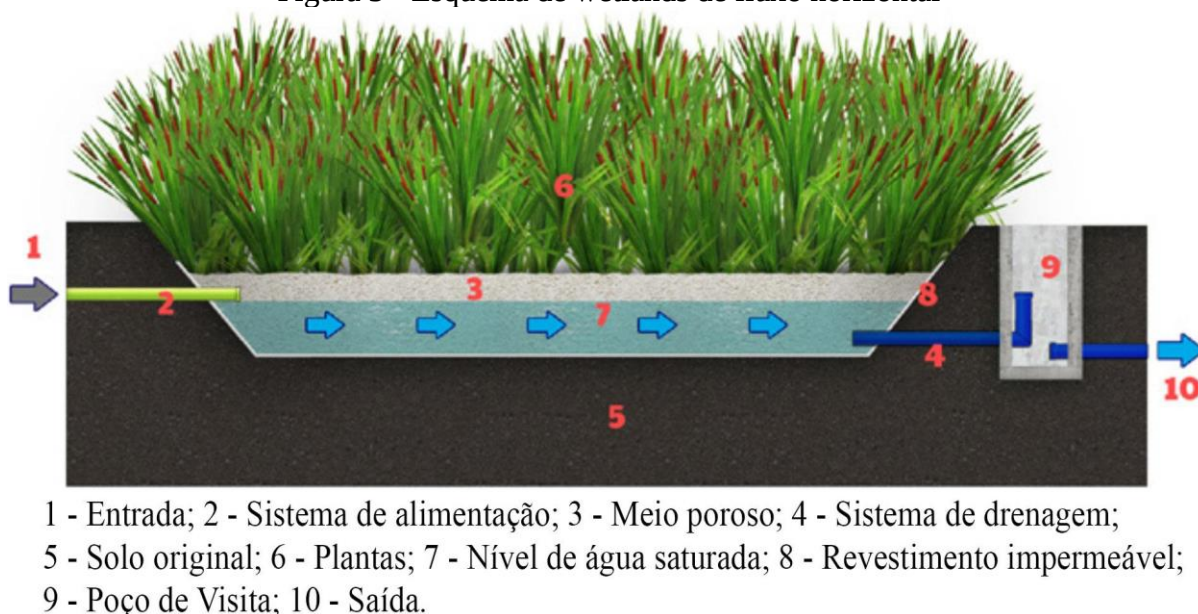
3.3.3. Wetlands de fluxo horizontal

Diferente dos sistemas verticais, os wetlands horizontais, o leito permanece constantemente saturado, criando um ambiente anóxico, enquanto que ao redor das raízes das macrófitas, há um ambiente aeróbio, portanto, o efluente terá contato com regiões aeróbias, anaeróbias e anóxicas (SEZERINO *et al.*, 2015). Com isso, ocorre a depuração por processos físico e químicos, principalmente pela atividade microbiológica (BRIX, 1997).

Dessa forma, os wetlands horizontais alcançam eficiência na remoção de mais de 75% dos sólidos suspensos, cerca de 65% da DBO, até 80% da DQO e, aproximadamente, 50% do nitrogênio e fósforo total (RIZZO; TONDERA, 2021).

Assim, como os wetlands verticais, os wetlands horizontais não apresentam riscos específicos relacionados à proliferação de mosquitos, o que é benéfico para a saúde pública. Conseguem lidar bem com variações hidráulicas, para obter um desempenho estável mesmo em situações de carga variável, podem ser integrados tanto em sistemas de esgoto separados quanto combinados e existe também a possibilidade de reutilização da água tratada. Em relação às desvantagens, elas estão relacionadas aos requisitos técnicos necessários para sua operação (RIZZO; TONDERA, 2021).

Figura 3 - Esquema de wetlands de fluxo horizontal



Fonte: Adaptado de Rizzo; Tondera, 2021.

3.3.4. Wetlands de superfície de água livre

Os wetlands de superfície de água livre, com sua lâmina d'água visível, são como espelhos d'água que simulam as zonas alagadas naturais projetados, principalmente, para funcionar como fases finais de polimento de efluentes já tratados ou para tratar águas inorgânicas, como as provenientes da mineração (WETLANDS BLOG, 2023b). Esses sistemas recriam ecossistemas aquáticos por meio do uso de macrófitas, que contribuem para a remoção de matéria orgânica do efluente, e absorver nitrogênio e fósforo. A própria vegetação atua como

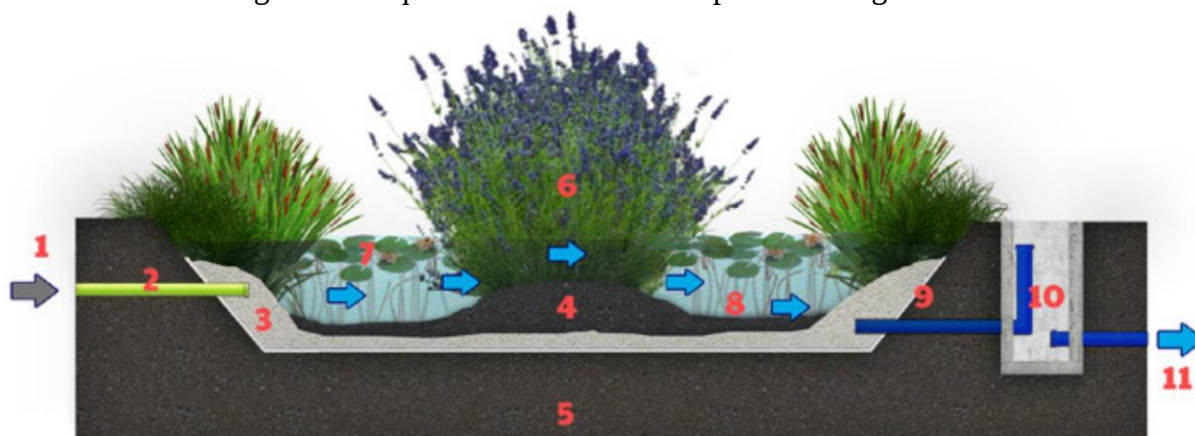
um obstáculo para a precipitação de óxidos metálicos e serve como substrato físico para biofilmes (GEARHEART, 2021).

Os wetlands de superfície de água livre são visualmente atraentes, porém, esses wetlands exigem atenção para evitar a proliferação de vetores e garantir um tempo de detenção hidráulica adequado, para assegurar a melhor eficiência do tratamento, que pode variar entre 41% e 90% de remoção de DQO, e em torno de 54% de remoção de DBO (GEARHEART, 2021).

Entre os principais benefícios do sistema, é destacado o baixo consumo de energia, visto que o sistema pode ser alimentado por gravidade, consegue lidar bem com variações na carga de efluentes, pode ser implementado em sistemas de esgoto separados ou em sistemas combinados e baixo custo de construção (GEARHEART, 2021).

No entanto, esse sistema pode se tornar habitats para mosquitos, o que exige uma atenção especial para evitar problemas relacionados à saúde pública, e a eficiência de tratamento dos wetlands de superfície livre pode variar conforme as estações do ano, apresentando menor desempenho em períodos de temperaturas mais baixas (GEARHEART, 2021).

Figura 4 - Esquema de wetlands de superfície de água livre



1 - Entrada; 2 - Sistema de alimentação; 3 - Meio Poroso; 4 - Meio de enraizamento; 5 - Solo original; 6 - Diferentes plantas aquáticas correspondentes a diferentes níveis de água; 7 - Nível de água; 8 - Zona profunda; 9 - Camada impermeável (revestimento ou argila compacta); 10 - Poço de Visita; 11 - Saída.

Fonte: Adaptado de Gearheart, 2021.

3.3.5. Wetlands para lodo

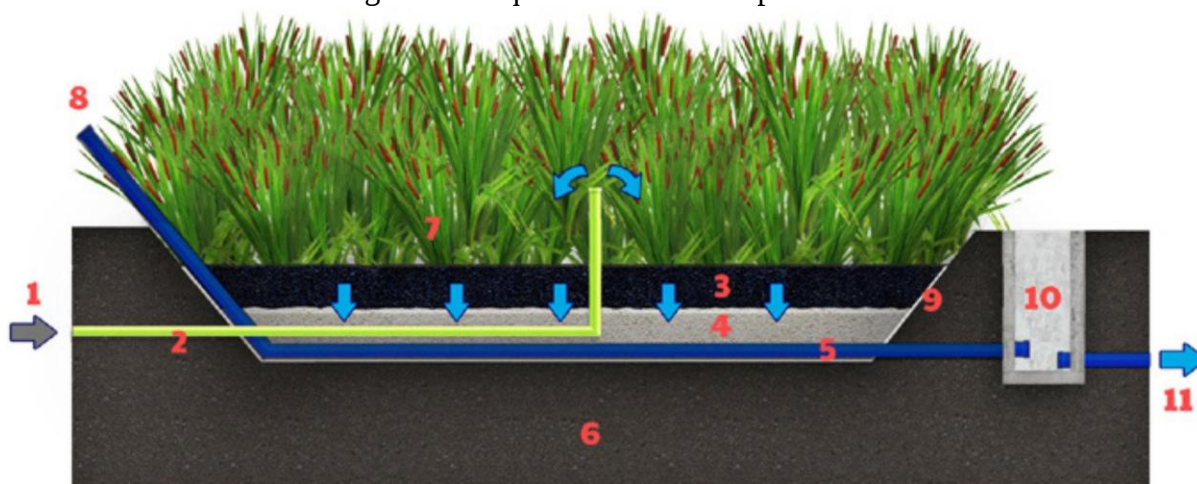
Os wetlands para lodo são projetados para tratar resíduos sólidos, como lodos orgânicos e inorgânicos, provenientes das estações de tratamento de efluentes ou de água. Tem como

objetivo desidratar, aproximadamente, 90% do lodo através de drenagem e evaporação, com ajuda de plantas e microrganismos. O processo transforma o resíduo em um bio sólido seguro, como um fertilizante agrícola. A operação é simples e sustentável, sem a utilização de produtos químicos, ruídos ou odores desagradáveis e deve cumprir os padrões definidos pelo CONAMA 498/20, que estabelecem os critérios e procedimentos para a produção e aplicação dos bio sólidos nos solos (WETLANDS BLOG, 2023b).

Entre os grandes benefícios desses sistemas, destaca-se a ausência de riscos com mosquitos, a alta eficiência energética e o fato de oferecerem uma solução de baixo custo para tratar o lodo, gerando um produto final de qualidade, que pode ser reaproveitado para agricultura ou fabricação de tijolos, por exemplo. Tudo isso ajuda a aliviar a sobrecarga nas estações de tratamento de esgoto (NIELSEN, 2021).

No entanto, antes de ser implementado, é necessário realizar uma série de testes de qualidade do lodo em sistemas-piloto, e o tempo para que o sistema atinja sua capacidade total pode ser longo. Além disso, a experiência com esses sistemas em larga escala ainda é escassa, especialmente quando se trata de plantas diferentes do *Phragmites australis* (caniço), que não pode ser usada em qualquer lugar, pois é considerada uma espécie invasora em alguns países (NIELSEN, 2021).

Figura 5 - Esquema de wetlands para lodo



- 1 - Entrada; 2 - Sistema de alimentação; 3 - Lodo; 4 - Camadas de diferentes tamanhos de meios porosos; 5 - Sistema de drenagem; 6 - Solo original; 7 - Plantas; 8 - Chaminé de aeração; 9 - Revestimento impermeável; 10 - Poço de Visita; 11 - Saída.

Fonte: Adaptado de Nielsen, 2021.

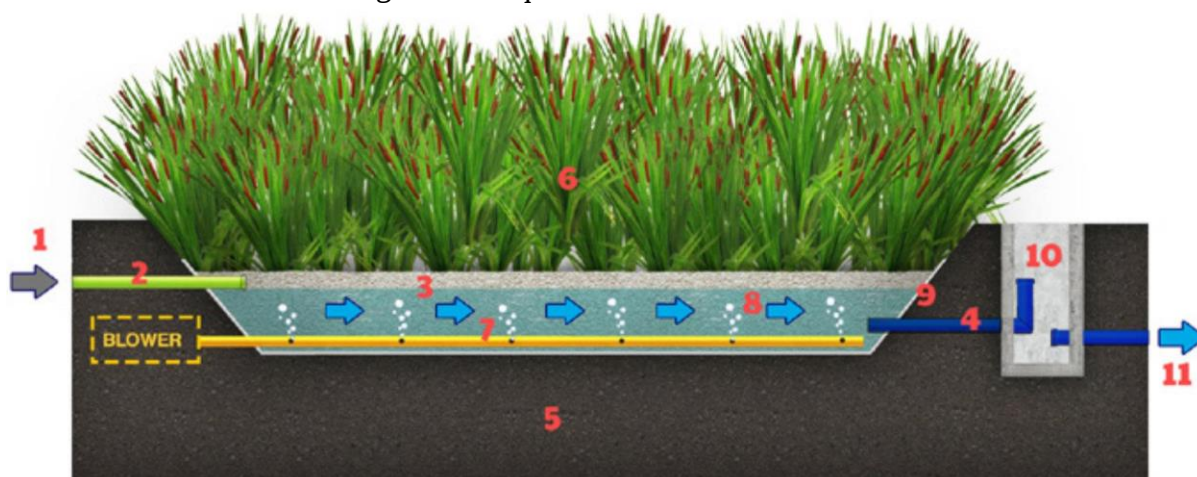
3.3.6. Wetlands aerados

Sistema híbrido que combina recursos naturais e artificiais, sendo capaz de operar tanto em fluxo vertical quanto horizontal, com a inclusão de aeração mecanicamente forçada, aumentando a eficácia do tratamento devido ao maior acesso a oxigênio para os microrganismos aeróbios. Da mesma forma que os wetlands horizontais tradicionais, esses sistemas não são projetados para tratar esgoto bruto diretamente, necessitando de uma fase prévia, sendo apropriados para tratar efluentes de origem doméstica, industrial e de atividades de mineração (WETLANDS BLOG, 2023b).

Os wetlands aerados se destacam por ocuparem menos espaço em relação a outras SBN, não oferecem perigo de proliferação de mosquitos, lidam bem com variações na carga de efluentes, têm potencial para reaproveitamento do efluente tratado e apresentam flexibilidade no projeto, que pode ser ajustado conforme com a capacidade do sistema de aeração (RIZZO, 2021).

No entanto, a operação de um sistema de aeração requer um gasto extra de energia, manutenção adicional e a utilização de componentes eletrônicos, que não são necessários em outros sistemas passivos de wetlands (RIZZO, 2021).

Figura 6 - Esquema de wetlands aerados



1 - Entrada; 2 - Sistema de alimentação; 3 - Meio poroso; 4 - Sistema de drenagem;
5 - Solo original; 6 - Plantas; 7 - Sistema de aeração; 8 - Nível de água saturada;
9 - Revestimento impermeável; 10 - Poço de Visita; 11 - Saída.

Fonte: Adaptado de Rizzo, 2021.

3.4. TIPOS DE SBN E SUAS CARACTERÍSTICAS

O livro *Nature-Based Solutions for Wastewater Treatment*, publicado pela IWA, possui uma análise com muitos detalhes sobre diversas SBN aplicadas ao tratamento de efluentes. É

apresentada a diversidade dessas tecnologias e sua eficiência para diferentes cenários. No Quadro 1, são listadas 25 SBN, que incluem diversos tipos de wetlands construídos e outras soluções.

O Quadro 2 descreve os tipos de águas residuais que podem ser tratados por essas tecnologias, incluindo efluente bruto, águas cinzas, efluentes diluídos pelo rio e outros. Essa diversidade de aplicação, tanto para comunidades rurais, quanto para áreas urbanas, reforça a ideia de adaptabilidade dos sistemas.

No Quadro 3 são fornecidos dados referentes ao requisito de tamanho por população equivalente, se é uma solução que pode ser de escala doméstica, bem como a eficácia na remoção de poluentes pelas SBN, como matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, sólidos em suspensão e agentes patogênicos. Estas informações mostram que as SBN são alternativas seguras e eficientes. Deve-se analisar qual tecnologia será mais adequada para as características do efluente local.

Por fim, o Quadro 4 apresenta os co-benefícios proporcionados pelas SBN, que vão além do tratamento de efluentes. As vantagens incluem a melhoria da fauna, flora, regulação de temperatura, mitigação de enchentes e tempestades, sequestro de carbono, produção de biomassa, etc. Essas vantagens são apresentadas em diferentes graus de influência, sendo baixa, média ou alta.

Quadro 1 - Nome das tecnologias baseadas na natureza para tratamento de efluentes

Índice	Nome da tecnologia (inglês)	Nome da tecnologia (português)
1	Slow-rate soil infiltration system	Sistema de infiltração de solo de taxa lenta
2	Rapid-rate soil infiltration system	Sistema de infiltração de solo de taxa rápida
3	Willow systems	Sistemas de salgueiro
4	Surface aerated ponds	Lagoas aeradas de superfície
5	Facultative ponds	Lagoas facultativas
6	Maturation ponds	Lagoas de maturação
7	Anaerobic ponds	Lagoas anaeróbias
8	High-rate anaerobic ponds	Lagoas anaeróbias de alta taxa
9	Vertical-flow TWs	Wetlands de fluxo vertical
10	French verticalflow TWs	Wetlands de fluxo vertical francês
11	TWs for combined sewer overflows (CSO-TWs)	Wetlands para transbordamento de esgoto combinado
12	Horizontal-flow TWs	Wetlands de fluxo horizontal
13	Aerated TWs	Wetlands aerados
14	Reciprocating (tidal flow) TWs	Wetlands reciprocantes (fluxo de maré)
15	Reactive media in TWs	Meios reativos em Wetlands
16	Free water surface TWs	Wetlands de superfície de água livre
17	Natural wetlands	Wetlands naturais
18	Floating TWs	Wetlands flutuantes
19	Multi-stage TWs	Wetlands de vários estágios
20	Sludge treatment reed beds	Canteiros de tratamento de lodo
21	Living walls	Paredes vivas
22	Rooftop TWs	Wetlands de telhado
23	Hydroponics	Hidroponia
24	Aquaponics	Aquaponia
25	In-stream restoration	Restauração in-stream

Fonte: Cross *et al.*, 2021.

Quadro 2 - Tipos de águas residuais recomendadas a serem tratadas pelas diferentes SBN

Índice	Tecnologia	Tipos de águas residuais recomendadas a serem tratadas pelas SBN				
		Efluente bruto	Águas cinzas	Tratamento primário	Tratamento secundário	Diluídas pelo rio
1	Sistema de infiltração de solo de taxa lenta		X	X	X	
2	Sistema de infiltração de solo de taxa rápida		X	X	X	X
3	Sistemas de salgueiro		X	X	X	
4	Lagoas aeradas de superfície	X		X	X	
5	Lagoas facultativas	X		X		
6	Lagoas de maturação				X	
7	Lagoas anaeróbicas	X		X		
8	Lagoas anaeróbicas de alta taxa					
9	Wetlands de fluxo vertical		X	X	X	
10	Wetlands de fluxo vertical francês	X				
11	Wetlands para transbordamento de esgoto combinado					
12	Wetlands de fluxo horizontal		X	X	X	
13	Wetlands aerados		X	X		
14	Wetlands reciprocantes (fluxo de maré)			X		
15	Meios reativos em Wetlands					
16	Wetlands de superfície de água livre		X		X	
17	Wetlands naturais				X	
18	Wetlands flutuantes		X	X		
19	Wetlands de vários estágios	X		X	X	
20	Canteiros de tratamento de lodo					
21	Paredes vivas		X			
22	Wetlands de telhado		X	X		
23	Hidroponia				X	X
24	Aquaponia				X	X
25	Restauração in-stream				X	X

Fonte: Adaptado de cross *et al.*, 2021.

Índice	Tecnologia	Eficiência de tratamento									
		Requisito de área (m²) per capita	Solução doméstica	DQO (%)	DBO (%)	Nitrogênio total (%)	NH ₄ -N (%)	Fósforo total (%)	Sólidos suspensos totais (%)	Coliformes fecais	E. coli
19	Wetlands de vários estágios										
20	Canteiros de tratamento de lodo										
21	Paredes vivas (valores para águas cinzas)	1 - 2	Sim	15 - 99	42	15 - 95	19	3 - 61	15 - 93	≤ 2 - 3 log	
22	Wetlands de telhado	170	Sim	80	>90	70 - 90	86	80 - 97	85 - 90		
23	Hidroponia	Não aplic	Sim	50		66	50	30	84		
24	Aquaponia	Não aplic	Sim	>73		62 - 90	34	60 - 90	>90		
25	Restauração in-stream					20 - 27	10 - 26	0,08			

Fonte: Cross *et al.*, 2021.

Quadro 4 - Co-benefícios das diferentes SBN

Índice	Tecnologia	Co-benefícios (A, alto; M, médio; B, baixo)												
		Biodiversi- dade (Fauna)	Biodiversi- dade (Flora)	Regulação de temperatura	Mitigação de enchentes	Mitigação de tempestade	Sequestro de carbono	Produção de biomassa	Valor estético	Recre- ação	Polini- zação	Fonte de alimentos	Reúso de água	Biossólidos
1	Sistema de infiltração de solo de taxa lenta	B	B	B		B			B				A	
2	Sistema de infiltração de solo de taxa rápida	B	B	B		B			B				A	
3	Sistemas de salgueiro	M	M		M		A	A	M	M	A			
4	Lagoas aeradas de superfície	B	B				B		B	B			A	A
5	Lagoas facultativas	M	B	B			B		B	B			B	B
6	Lagoas de maturação	M	B	B			B		B	B			A	B
7	Lagoas anaeróbicas	M	B	B					B	B			B	M
8	Lagoas anaeróbicas de alta taxa	M	B	B					B				B	M
9	Wetlands de fluxo vertical	M	B				B	M	B	B			A	
10	Wetlands de fluxo vertical francês	M	B				B	M	B	B			A	A
11	Wetlands para transbordamento de esgoto combinado	M	B			B	B	M	B	B			A	
12	Wetlands de fluxo horizontal	M	B			A	B	M	B	B			A	
13	Wetlands aerados	B	B				B	M	B	B			A	
14	Wetlands reciprocantes (fluxo de maré)	M	B				B	M	B	B			A	
15	Meios reativos em Wetlands	M	B				B	M	B	B			A	

Índice	Tecnologia	Co-benefícios (A, alto; M, médio; B, baixo)												
		Biodiversi- dade (Fauna)	Biodiversi- dade (Flora)	Regulação de temperatura	Mitigação de enchentes	Mitigação de tempestade	Sequestro de carbono	Produção de biomassa	Valor estético	Recre- ação	Polini- zação	Fonte de alimentos	Reúso de água	Biossólidos
16	Wetlands de superfície de água livre	A	A	B	M		M	A	A	M	M		A	
17	Wetlands naturais	A	A	B	A	A	A	A	A	A	M	A	A	
18	Wetlands flutuantes	A	A	B	M		M	A	A	M	M		M	
19	Wetlands de vários estágios													
20	Canteiros de tratamento de lodo	M	B				B	M	B	B			A	A
21	Paredes vivas	M	A	A			M	B	A	B	A	B	A	
22	Wetlands de telhado	M	A	A		M	M	B	A	B	A	B	A	
23	Hidroponia						M		B			A	A	B
24	Aquaponia						M		B			A	A	M
25	Restauração in-stream	A			A		M	B	A	A		M		

Fonte: Adaptado de Cross *et al.*, 2021.

3.5. FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA DAS SBN

Segundo aponta Lautenschlager (2001), diversos elementos impactam na eficácia dos sistemas naturais, como os wetlands construídos, na tarefa de remover poluentes. São fatores que interagem de diferentes maneiras, como clima, solo, elementos biológicos e a qualidade das águas residuais.

3.5.1. Fatores climáticos

A temperatura é um fator que influencia a eficiência dos wetlands construídos, desde o ritmo das atividades microbianas até a capacidade do sistema em remover nutrientes e compostos orgânicos. Em climas frios, há uma redução das atividades das macrófitas e dos microrganismos responsáveis pela degradação de poluentes, o que diminui a performance do sistema (VARMA *et al.*, 2020). Por outro lado, temperaturas mais altas favorecem o crescimento de plantas e a atividade microbiológica, elevando a eficiência do tratamento (ZHANG *et al.*, 2014).

A luz do sol, por sua vez, quanto mais intensa e duradoura esta exposição à radiação solar, influenciará a fotossíntese das plantas, consequentemente, na eficiência dos wetlands também (LAUTENSCHLAGER, 2001).

A precipitação pode alterar a vazão as concentrações nos wetlands, diluindo ou, em alguns casos, concentrando os poluentes presentes na água. Para lidar com esses picos vazão, as variações na precipitação devem ser consideradas durante o projeto e operação dos sistemas para evitar sobrecargas, as quais poderiam comprometer a eficiência do tratamento (LAUTENSCHLAGER, 2001).

Em algumas situações, o vento gera turbulência no escoamento (efeito mistura), o que pode alterar a taxa de evapotranspiração e oxigenação do efluente, melhorando a eficiência do tratamento (LAUTENSCHLAGER, 2001).

Pesquisas de Zhang *et al.* (2014) e Varma *et al.* (2021) indicam que, em climas tropicais e subtropicais, onde o calor e o sol predominam grande parte do ano, os wetlands têm bons resultados, acelerando o metabolismo dos microrganismos decompositores. Já em regiões de clima temperado, onde o frio é mais frequente e a incidência solar menor, os processos perdem eficiência.

3.5.2. Solo e geologia

A interação entre poluentes e o solo nos wetlands é uma das principais formas de tratamento, com a sorção (processo em que o solo adsorve e retém substâncias). A eficácia desse processo depende das características, tanto do solo quanto dos poluentes envolvidos. Para evitar a infiltração de poluentes no lençol freático, é importante que os wetlands possuam uma camada de solo que sirva de barreira, mas também pode-se utilizar materiais como mantas geotêxteis ou impermeabilizantes para reforçar essa proteção das águas subterrâneas (LAUTENSCHLAGER, 2001).

Solos que permitem maior contato entre o efluente e o substrato, ou seja, superfície de contato maior, promovem a retenção de fósforo, como em sistemas subsuperficiais horizontais, que mantêm o solo constantemente saturado e minimizam as variações no potencial redox, favorecendo a remoção de nutrientes (ZHANG *et al.*, 2014).

A escolha de materiais adequados para o substrato e a gestão correta do sistema hidráulico ajudam a evitar o entupimento, que pode reduzir a eficiência do sistema (SEZERINO *et al.*, 2018).

3.5.3. Fatores biológicos

Os processos biológicos são fundamentais para os wetlands, visto que a vegetação age na remoção de nutrientes e poluentes, usando as raízes para a adsorção e estimulam a atividade microbiana ao liberar oxigênio na rizosfera (ZHANG *et al.*, 2014). Por este fato, deve-se atentar na escolha das espécies vegetais, pois apresentam capacidades variadas para a remoção de nutrientes e acúmulo de metais pesados (ZHANG *et al.*, 2014), e o manejo para garantir o bom funcionamento do sistema (LAUTENSCHLAGER, 2001).

Além das plantas, os microrganismos presentes fazem a decomposição da matéria orgânica e nutrientes. No entanto, é importante monitorar a presença de organismos patogênicos nos efluentes tratados, garantindo que o efluente final esteja dentro dos padrões de lançamento ou reuso (LAUTENSCHLAGER, 2001; ZHANG *et al.*, 2014).

3.5.4. Características das águas residuais

A vazão e a composição das águas residuárias que entram no sistema são variáveis que devem ser consideradas para a escolha do tipo de sistema (fluxo vertical ou horizontal) e

dimensionamento (ZHANG *et al.*, 2014). As flutuações diárias e sazonais exigem que o sistema seja flexível o suficiente para lidar com as variações sem perder eficiência, além disso, faz-se necessário conhecer as concentrações dos contaminantes no efluente para definir as condições ideais de operação e garantir que o tratamento realmente atenda às exigências de qualidade (LAUTENSCHLAGER, 2001).

Efluentes com altas concentrações podem sobrecarregar os sistemas, reduzindo a eficiência de remoção de contaminantes. Para isso, sistemas híbridos, são eficazes em tratar efluentes com altas concentrações de nutrientes e sólidos, como águas residuais domésticas e efluentes industriais (ZHANG *et al.*, 2014).

3.5.5. Operação e manutenção

Aspectos como a alternância de módulos (SEZERINO; PELISSARI, 2021), a frequência e a forma da poda das macrófitas, para evitar a liberação de nutrientes/poluentes acumulados nas plantas de volta ao sistema, e o controle de pragas são manutenções que devem ser feitas para que o sistema funcione corretamente e atinja boa eficiência na remoção de poluentes (SEZERINO *et al.*, 2018).

3.6. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

3.6.1. Ao redor do mundo

Os sistemas de wetlands construídos têm sido implementados em diferentes partes do mundo, demonstrando sua flexibilidade para atender diversas demandas de tratamento de efluentes. O Wetlands Blog (2023b) uniu nove grandes exemplos que se destacam por suas dimensões e diversas aplicações, incluindo efluentes domésticos, industriais, drenagem ácida de minas e águas residuais de prospecção de petróleo.

Um ponto comum entre vários desses sistemas é o foco na sustentabilidade e a capacidade de integrar-se de forma harmônica ao meio ambiente. Em países como China (Changshu Industrial Park Tertiary Treatment Wetland), Coreia do Sul (Sihwa Constructed Reed Wetland), Itália (Fusina Treatment Wetlands) e Moldávia (Wetlands de Orhei), há grandes sistemas que fazem o tratamento de efluentes industriais e, alguns ainda, reutilizam este efluente tratado para a indústria.

Os Estados Unidos possuem dois grandes wetlands (Clayton County Constructed Wetlands e o East Fork Wetland) para tratamento de efluente doméstico, transformando-os em água potável. Os wetlands da Itália e Moldávia, fazem o tratamento do efluente industrial e, também, do efluente doméstico.

O maior wetlands construído do mundo está localizado em Omã, com uma área de 230 hectares, o Bauer Nimr Water Treatment Plant (Figura 7), o qual faz o tratamento de até 175.000 m³/d de efluente da prospecção de petróleo, uma vazão equivalente de 1.093.750 habitantes, a partir de um sistema operado por gravidade, o que ajuda a reduzir os custos operacionais e de manutenção.

Figura 7 - Bauer Nimr Water Treatment Plant



Fonte: Water World International, 2017.

Nos Estados Unidos, o Tar Creek Treatment System é utilizado no tratamento de drenagem ácida de minas, e na Inglaterra, o Henningfield Sludge Treatment Reed Bed System trata o lodo gerado em estações de tratamento de água, reduzindo o volume de resíduos sólidos, com economia energética e de manejo do lodo, posteriormente.

Estes exemplos mostram como os wetlands construídos apresentam soluções sustentáveis para tratar diferentes tipos de efluentes, reduzir custos operacionais, custos de manutenção e outros benefícios.

3.6.2. Santa Catarina

No livro *Wetlands Construídos como Ecotecnologia para o Tratamento de Águas Residuárias: experiências brasileiras*, de Sezerino e Pelissari (2021), os autores relatam que a partir da segunda metade dos anos 1990 e início dos anos 2000, diversas unidades de wetlands

construídos de escoamento horizontal foram implantadas após tanques sépticos nos Centros de Treinamento da Epagri, em Santa Catarina, sendo alguns deles considerados um dos mais antigos em operação para o tratamento de esgoto no Brasil, e que, com a adoção de ações operacionais simples, foi possível enfrentar os problemas como empoçamentos de esgoto e a presença de plantas invasoras.

3.7. CUSTOS E VIABILIDADE

3.7.1. Custos de implantação

Os sistemas de wetlands de fluxo horizontal subsuperficial, projetados para residências, são conhecidos pela eficiência de espaço e menor custo. Segundo estudo de Santos (2019), uma residência com cinco moradores precisaria de, aproximadamente, 10 m² para instalar um sistema wetlands, com custo total de cerca de R\$5.493,32. Os maiores gastos seriam na alvenaria, representando R\$1.427,14 (26% do total), e a aquisição do tanque séptico para sedimentação, com custo de R\$1.083,43 (20% do total).

Em outro estudo, Perondi *et al.* (2019) avaliaram que o custo de um sistema para atender dez pessoas seria de R\$13.064,10, abrangendo fundações, alvenaria, impermeabilização, tubulação e bombas. Os principais custos incluíram concreto e armadura, a R\$2.235,00 (17% do total), brita como material filtrante, a R\$1.457,08 (11%), impermeabilização, a R\$1.128,00 (9%), e as duas bombas centrífugas, que representaram o maior custo, de R\$5.575,00 (43%).

A partir destes dois estudos, fica claro que os maiores custos na implantação de um sistema de wetlands construídos está na alvenaria e na automatização, principalmente. Por isso, ter um sistema que funcione por gravidade, é uma grande vantagem das SBN.

3.7.2. Custos de operação

Os custos operacionais de sistemas wetlands para tratamento secundário de efluentes apresentam vantagens quando comparados a tecnologias convencionais. Estima-se que o custo de operação de um sistema de wetlands seja entre R\$0,20 e R\$0,80 por metro cúbico de efluente tratado (WETLANDS BLOG, 2023b), em que, essa variação se dá conforme o porte da instalação e o tipo de tecnologia adotada.

Como o manejo de resíduos nos wetlands acontece, em média a cada dez anos, há uma grande economia em mão de obra e baixo custo de manutenção (SANTOS, 2019). De acordo

com Perondi *et al.* (2019), o custo anual de operação de um sistema wetlands para dez pessoas é estimado em cerca de R\$ 1.100,00 com os custos associados, principalmente, ao consumo de energia para o acionamento das bombas. Caso o sistema opere por gravidade, os custos operacionais podem ser ainda menores.

O estudo de Schroeder (2020) comparou sistemas de wetlands construídos de fluxo vertical, que operavam com o uso de duas bombas hidráulicas durante 20 minutos por dia, a sistemas de tratamento de efluentes por lodos ativados em batelada, que utilizavam três bombas hidráulicas e um aerador submersível, funcionando durante 11 horas por dia. Os resultados revelaram que o custo total de energia para a operação dos wetlands de fluxo vertical seria de R\$ 9,47 ao mês, enquanto, para o sistema de lodos ativados, esse valor seria de R\$ 280,02 ao mês, aproximadamente 30 vezes superior.

O custo com operadores em wetlands construídos de fluxo horizontal é necessário com uma frequência mensal, enquanto, para os wetlands de fluxo vertical, a periodicidade seria quinzenal. Já para um sistema de lodos ativados em batelada, a operação deve ocorrer duas vezes por semana (SCHROEDER, 2020). Pode-se afirmar, portanto, que os sistemas de wetlands de fluxo horizontal apresentam o menor custo nesse parâmetro, seguidos pelos wetlands de fluxo vertical, com o dobro do valor. Por sua vez, os sistemas de lodos ativados em batelada apresentam custos até oito vezes superiores aos dos wetlands de fluxo horizontal e quatro vezes maiores em relação aos wetlands de fluxo vertical.

3.7.3. Viabilidade e vantagem econômica

Além de serem mais econômicos para operar, os sistemas wetlands se destacam também com sua durabilidade e eficiência. Esses sistemas são opções factíveis para comunidades e áreas rurais, onde sistemas centralizados são menos viáveis. A baixa demanda por energia e a baixa necessidade de manutenção tornam as tecnologias baseadas na natureza um recurso inteligente, sustentável e econômico (PERONDI *et al.*, 2019; SANTOS, 2019).

3.8. LEGISLAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS

A Lei nº 14.904, de 27 de junho de 2024, estabelece diretrizes para a criação de planos de adaptação às mudanças climáticas, destacando a adoção de soluções baseadas na natureza como uma das estratégias para adaptação e mitigação dos efeitos negativos das mudanças climáticas (GONÇALVES, 2024).

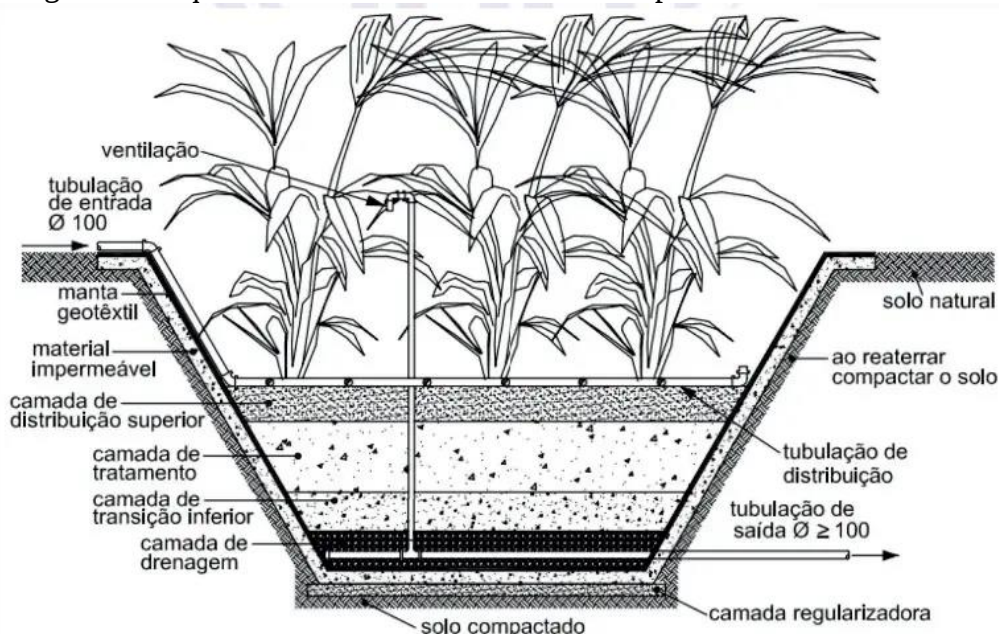
“Art. 2º São diretrizes dos planos de adaptação à mudança do clima:

VIII - a adoção de soluções baseadas na natureza como parte das estratégias de adaptação, considerando seus benefícios adicionais e sua capacidade de integrar resultados para adaptação e mitigação, simultaneamente” (BRASIL, 2024).

A norma técnica para projetos de sistemas de tratamento de esgoto no lote, também passou por atualizações significativas. A norma técnica ABNT NBR 17076:2024 (“Projeto de sistema de tratamento de esgoto de menor porte – Requisitos”), que entrou em vigor em 26 de abril de 2024, atualizou e unificou as diretrizes anteriores (ABNT NBR 7229:1993 e NBR 13969:1997). A norma traz orientações para o dimensionamento, instalação, operação e manutenção de sistemas de menor porte, incluindo wetlands, como a Figura 8 apresenta, e vermifiltro como outra SBN para o tratamento de efluente líquido.

A utilização de dados de consumo de água para o dimensionamento de sistemas, a obrigatoriedade de manuais de operação e manutenção, e a introdução de novas soluções de tratamento foram algumas das novidades desta norma. Entretanto, também, foram estabelecidas restrições para sistemas que recebem uma contribuição diária superior a 12.000 litros e carga orgânica de até 3,80 kg de DBO/dia (KERNE, 2024; ÁGUA & EFLUENTES, 2024; ABNT:NBR 17.076, 2024). Com isso, profissionais e empresas do setor precisam adaptar seus projetos às novas exigências para assegurar a conformidade e evitar penalidades (VIGILÂNCIA SANITÁRIA DE FLORIANÓPOLIS, 2024).

Figura 8 - Esquema de wetlands de fluxo vertical presente na NBR 17076



Fonte: NBR 17076/2024.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A partir dos objetivos específicos, foram desenvolvidos três caminhos para realizar o trabalho, em que consiste na fundamentação teórica, coleta de opiniões e sintetização dos dados obtidos, a fim de facilitar a visualização e compreensão dos resultados obtidos.

4.1. COMPARAÇÕES DE SBN

4.1.1. Coleta de dados de SBN

A pesquisa foi conduzida com a proposta de comparar diferentes tecnologias de SBN para o tratamento de efluentes domésticos, focando, principalmente, na eficiência de remoção de poluentes. O objetivo foi entender como essas tecnologias se comportam em situações reais e quão eficientes elas são com base nos dados da literatura.

4.1.1.1. Procedimento utilizado

A coleta de dados foi realizada por meio de uma revisão da literatura. Foram consultados artigos científicos, livros técnicos e outros documentos acadêmicos que fornecem informações sobre as diversas tecnologias de SBN. Também, foram analisados estudos de caso, tanto locais quanto internacionais, explorando exemplos de aplicação na região de Santa Catarina e em outras partes do mundo. A escolha por fontes já publicadas foi uma maneira de garantir uma base confiável para a análise comparativa, visto que não houve coletas de dados laboratoriais neste estudo.

4.1.1.2. Critérios de seleção das tecnologias

Para escolher as tecnologias a serem comparadas, alguns critérios foram traçados para garantir a qualidade e relevância dos dados coletados. Os principais pontos analisados foram:

- a) Sistemas visitados: a pesquisa incluiu visitas a empresas que utilizam SBN para o tratamento de efluentes, portanto, estes sistemas foram escolhidos para análise, permitindo a coleta de dados diretos sobre o funcionamento, operação e desempenho dessas tecnologias.

- b) Eficiência na remoção de poluentes: foram priorizados os sistemas com alta eficiência na remoção de DBO, DQO, nitrogênio, fósforo, sólidos suspensos e outros poluentes. Esses índices foram comparados com os resultados observados em outros estudos, a fim de garantir que as tecnologias se destacassem em termos de desempenho.
- c) Aplicabilidade em diferentes tipos de efluentes: considerou-se o tipo de efluente para o qual cada tecnologia é recomendada, levando em conta diferentes contextos de aplicação, para que cada sistema fosse adequado ao tipo de efluente a ser tratado.
- d) Co-benefícios ambientais: foram analisados os benefícios adicionais, além do tratamento de efluentes, que cada sistema poderia oferecer, como o aumento da biodiversidade, o sequestro de carbono, a regulação da temperatura, e outros aspectos que pudessem contribuir para a melhoria do meio ambiente.

4.1.2. Análise de dados para comparação de SBN

Para a comparação das SBN, foram elaborados quadros e gráficos de barras que sintetizem os dados coletados, com objetivo facilitar a interpretação das informações, destacando as principais diferenças e semelhanças entre as tecnologias analisadas. Os dados quantitativos, como os valores eficiência no tratamento de poluentes (DBO, DQO, nutrientes, etc.) foram organizados para fornecer uma visão clara e direta dos resultados.

Os dados qualitativos estão presentes no formato de quadros e gráficos de radar. Esse tipo de gráfico é composto por polígonos, nos quais valores mais próximos do centro indicam desempenho ou influências menores, enquanto valores mais distantes representam maior intensidade na variável correspondente. A forma resultante permite identificar padrões entre as variáveis. Também foram produzidos textos destacando os tipos de água residual que as SBN podem tratar e os co-benefícios gerados.

O uso desses elementos gráficos ajuda a reconhecer padrões, como tecnologias que demonstram maior eficiência em determinado parâmetro ou que oferecem benefícios ambientais adicionais.

4.2. DEPOIMENTOS

4.2.1. Coleta de dados e depoimentos

Foi realizada uma coleta de depoimentos de especialistas, empresas e usuário sobre a aplicação de SBN para o tratamento de efluentes, visando obter diferentes pontos de vistas, experiências práticas e conhecimentos técnicos que permitissem compreender melhor o desempenho, os desafios e as vantagens dessas tecnologias em diferentes perspectivas.

4.2.1.1. Tipo de pesquisa

A pesquisa adotou uma abordagem mais qualitativa, para compreender as percepções, experiências, opiniões e desafios enfrentados no âmbito das SBN considerando a diversidade de experiências dos participantes. Enquanto que o aspecto quantitativo foi pontual, para saber há quantos anos o usuário utiliza/utilizou o sistema.

4.2.1.2. Definição das amostras

Para definir as amostras, foi identificado que a população alvo abrangeria três grupos distintos: especialistas, que estudam e entendem os princípios da tecnologia, empresas, que estão colocando as SBN em prática e os usuários, que experimentam o sistema no dia a dia de suas casas. Ao todo, 12 pessoas colaboraram com a pesquisa, sendo 7 especialistas, 4 empresas e 1 usuário, obtendo uma diversidade de opiniões e experiências.

O questionário desenvolvido para a pesquisa incluiu tanto perguntas fechadas quanto abertas. As questões fechadas facilitaram a quantificação de dados específicos, enquanto as abertas proporcionaram aos participantes a oportunidade de compartilhar opiniões, experiências e comentários.

4.2.1.3. Métodos de coleta

A coleta de depoimentos foi realizada por meio de três formulários distintos: um para especialistas, um para empreendedores e outro para o usuário. Os questionários foram distribuídos por e-mail, WhatsApp, presencialmente e pela plataforma Google Forms, buscando atingir quantidade e qualidade com amostras diversificadas. As entrevistas foram realizadas de maneira individual, com um tempo médio de 5 a 10 minutos para cada participante responder as questões.

4.2.1.4. *Aspectos éticos*

No início da participação voluntária da pesquisa, todos os participantes receberam uma explicação sobre os objetivos do estudo, e no final dos questionários, havia uma opção com o termo de consentimento, onde o participante autoriza o uso das suas respostas para fins acadêmicos e de pesquisa.

4.2.2. **Análise de dados e depoimentos**

4.2.2.1. *Métodos de análise*

Os dados e depoimentos foram examinados e interpretados com objetivo de extrair informações significativas sobre a experiência, opinião ou constatação feita pelo entrevistado, focando, também, na identificação de padrões de certos temas ou conceitos dentro do depoimento.

O software Excel foi utilizado para criar quadros e tabelas para realizar análises estatísticas simples, permitindo uma visualização clara dos resultados para facilitar a comparação dos dados obtidos.

4.2.2.2. *Limitações da metodologia*

A pesquisa pode ter algumas limitações, como o viés na seleção da amostra e há possibilidade de não representar completamente todas as realidades das SBN em Florianópolis, por não abranger todos estes sistemas.

4.2.3. **Questionários**

4.2.3.1. *Questionário para especialistas*

O questionário aplicado aos especialistas visou obter uma visão técnica e fundamentada sobre os SBN, focando nos benefícios, desafios e no papel das políticas públicas para incentivar a adoção dessas soluções. Para entender o campo de atuação dos entrevistados, foi feita a pergunta: “Qual é o seu campo de especialização?”. A seguir, buscou-se identificar as tecnologias mais eficazes segundo a experiência dos especialistas com a pergunta: “Com base

em sua experiência, qual tecnologia de SBN você considera mais eficiente e consolidada para o tratamento de efluentes domésticos descentralizados?”.

Para avaliar os benefícios observados, foi perguntado: “Qual a sua avaliação sobre o principal benefício das SBN em comparação com sistemas convencionais?”. Além disso, para identificar as barreiras à adoção das SBN, foi questionado: “Quais os principais desafios que as SBN enfrentam em termos de aceitação e implementação no Brasil?”, com opções como “Falta de conhecimento desta opção”, “Não achar viável / Falta de conhecimento técnico”, “Custo de implementação” ou “Outro (especificar)”.

Sobre o reuso de efluentes tratados, a pergunta foi: “Quais são os principais fatores que limitam o reuso de efluentes tratados por SBN no Brasil?”, com as opções “Limitação regulatórias”, “Custo adicional”, “Barreiras de aceitação”, “Qualidade do efluente” ou “Outro (especificar)”. Para discutir a evolução das políticas públicas, foi feita a seguinte pergunta: “Na sua opinião, como as políticas públicas brasileiras podem evoluir para incentivar a adoção de SBN?”.

A fim de explorar inovações tecnológicas, foi perguntado: “Quais inovações tecnológicas você acredita que podem impulsionar o uso das SBN?”. Também foi solicitado aos especialistas que compartilhassem exemplos ou estudos de caso relevantes: “Há algum exemplo ou estudo de caso específico que você considera referência no uso de SBN para tratamento de efluentes descentralizados?”. Finalmente, para permitir comentários adicionais, foi oferecido o campo: “Você gostaria de adicionar mais algum comentário ou sugestão sobre SBN?”.

4.2.3.2. *Questionário para empresas*

O questionário direcionado às empresas procurou compreender a experiência delas com o uso de SBN para tratamento de efluentes. Primeiramente, para identificar o setor de atuação, foi feita a pergunta: “Qual é o setor de atuação da empresa?”. Para conhecer a tecnologia utilizada, perguntou-se: “Qual tipo de Sistema Baseado na Natureza é utilizado na empresa para tratamento de efluentes?”.

Para entender as motivações para a adoção das SBN, foi perguntado: “Por que a empresa optou por adotar uma solução baseada?”, com o objetivo de entender aspectos como custo, sustentabilidade e eficiência. Para comparar a viabilidade econômica, foi feita a pergunta: “Como você avalia o custo de implementação e manutenção do Sistema Baseado na Natureza em comparação com sistemas convencionais?”, com opções de resposta como “Muito mais barato”, “Moderadamente mais barato”, “Custo semelhante” ou “Mais caro”.

Buscando identificar os benefícios econômicos ou de imagem, foi perguntado: “A empresa obteve algum benefício econômico ou reputacional após a instalação do sistema?”. Para saber sobre a prática de reuso de efluentes, foi feita a pergunta: “A empresa utiliza a água tratada para algum reuso?”, com respostas “Sim” ou “Não”. Para avaliar a eficácia do sistema, foi perguntado: “O sistema atendeu às expectativas de eficiência no tratamento de efluentes?”. Caso negativo, foi solicitado que detalhassem as falhas ou deficiências observadas.

Foi questionado também: “A empresa teve algum desafio ou dificuldade na implantação ou manutenção do sistema?”. Para entender a percepção dos stakeholders internos e externos, perguntou-se: “Qual a opinião dos colaboradores e clientes da empresa sobre a adoção de um Sistema Baseado na Natureza?”. Por fim, para identificar melhorias que possam incentivar a adoção da tecnologia, foi perguntado: “Na sua visão, quais seriam as principais melhorias necessárias para incentivar mais empresas a adotarem o Sistema Baseado na Natureza?”.

4.2.3.3. *Questionário para usuário*

O questionário aplicado aos usuários buscou entender suas motivações, desafios e a experiência com os SBN em suas propriedades. Inicialmente, para identificar o tipo de sistema utilizado, perguntou-se: “Qual é o tipo de sistema baseado na natureza utilizado na sua residência/propriedade para o tratamento de esgoto?”. Para avaliar a experiência do usuário, foi perguntado: “Há quanto tempo você utiliza este sistema?”, com as opções “Menos de 1 ano”, “1-5 anos” ou “Mais de 5 anos”.

Para compreender as razões da escolha do sistema, foi perguntado: “Qual foi o motivo principal para a escolha de um sistema baseado na natureza?”. Para identificar problemas operacionais, a pergunta foi: “Você já teve algum problema operacional com o sistema? Se sim, qual foi o problema e como foi resolvido?”.

A fim de avaliar a eficiência do sistema, foi perguntado: “Como você avalia a eficiência do sistema na remoção de odores?”, com as alternativas “Muito eficiente”, “Eficiente”, “Pouco eficiente” ou “Ineficiente”. Também foi perguntado: “Você utiliza a água tratada para algum fim específico (irrigação, lavagem de áreas externas, etc.)?”.

Para identificar as vantagens percebidas, foi questionado: “Na sua opinião, quais são as maiores vantagens desse tipo de sistema em relação aos convencionais?”. Para entender as dificuldades enfrentadas, a pergunta foi: “Quais são os principais desafios ou dificuldades que você enfrentou ao usar o sistema?”.

Por fim, para avaliar a satisfação geral e a probabilidade de recomendação, foi feita a pergunta: “Você recomendaria o uso de SBN para vizinhos ou outras pessoas? Por quê?”. Também foi aberta uma oportunidade para sugestões: “Há alguma sugestão que você daria para melhorar o sistema que você usa?”.

4.3. SINTETIZAÇÃO DOS DADOS

4.3.1. Compilação de dados

Um mapa foi feito através do software QGIS para visualizar a distribuição geográfica das tecnologias de SBN identificadas em Florianópolis e destacar exemplos de aplicação em diferentes localidades, facilitando a identificação de padrões espaciais. Também foram elaborados gráficos no Excel para apresentar as respostas objetivas sobre os conhecimentos e experiências com as tecnologias de SBN.

4.3.2. Análise e interpretação dos resultados

A análise dos resultados foi realizada a partir dos gráficos gerados, que permitiram identificar padrões, relações entre as respostas e as principais vantagens e desafios percebidos por usuário, empresários e especialistas em relação às SBN. Através dessa metodologia, buscou-se contribuir para a discussão e o avanço destas tecnologias no tratamento de efluentes no lote.

Para a construção dos gráficos, foram utilizadas as respostas de questões fechadas dos questionários aplicados aos grupos de análise. As questões foram organizadas conforme as categorias abaixo:

Especialistas:

- a) Principal benefício dos SBN em comparação com sistemas convencionais;
- b) Desafios das SBN com aceitação e implementação;
- c) Fatores que limitam o reuso de efluentes tratados por SBN;
- d) Como as políticas públicas podem evoluir para incentivar a adoção de SBN.

Empresas:

- a) Benefício econômico ou reputacional;
- b) Se faz o reuso de efluentes;
- c) Atendimento das expectativas;

d) Desafio de implantação ou manutenção.

Usuário:

- a) Quanto tempo usou esta SBN;
- b) Problemas operacional com o sistema;
- c) Como avalia a eficiência do sistema na remoção de odores;
- d) Uso da água tratada para algum fim específico;
- e) Se recomendaria o uso de SBN para outras pessoas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. COMPARAÇÃO DE SBN PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS

Para a comparação entre SBN, foram selecionadas as tecnologias com base nos sistemas visitados, e em critérios de eficiência na remoção de poluentes, aplicabilidade em diferentes tipos de efluentes e co-benefícios ambientais. Estas tecnologias são:

- a) Wetlands de Fluxo Vertical;
- b) Wetlands de fluxo Vertical Francês;
- c) Wetlands de Fluxo Horizontal;
- d) Wetlands de Superfície de Água Livre;
- e) Wetlands para Tratamento de Lodo;
- f) Wetlands Aerados.

5.1.1. Tipos de Águas Residuais Tratáveis pelas SBN

O Quadro 5 apresenta uma lista das tecnologias de SBN e a classificação dos diferentes tipos de efluentes que podem ser tratados em cada sistema. Esses efluentes incluem efluente bruto, águas cinzas, efluentes submetidos a tratamentos primário e secundário, e diluídos por corpos d'água, como rios.

Quadro 5 - Tipos de águas residuais recomendadas a serem tratadas pelas SBN selecionadas

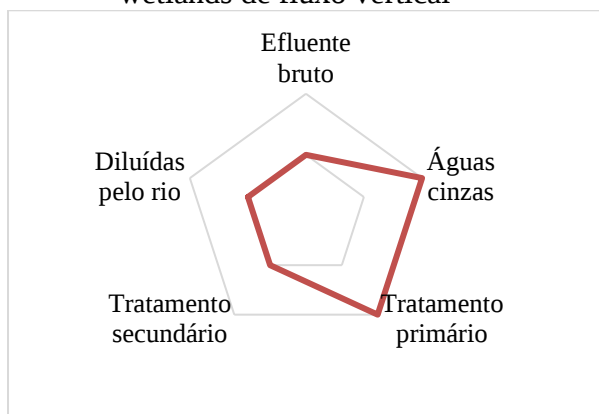
Índice	Tecnologia	Tipos de águas residuais recomendadas a serem tratadas pelas SBN				
		Efluente bruto	Águas cinzas	Tratamento primário	Tratamento secundário	Diluídas pelo rio
9	Wetlands de fluxo vertical		X	X	X	
10	Wetlands de fluxo vertical francês	X				
12	Wetlands de fluxo horizontal		X	X	X	
13	Wetlands aerados		X	X		
16	Wetlands de superfície de água livre		X		X	
20	Canteiros de tratamento de lodo	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

n/a: não aplicável.

Fonte: Adaptado de Cross *et al.*, 2021.

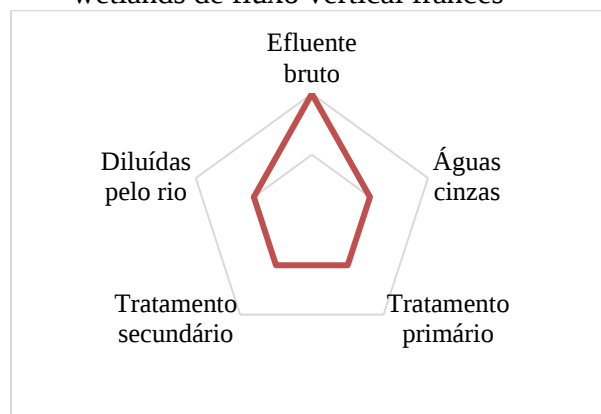
Os dados contidos no Quadro 5 foram sintetizados em gráficos de radar, apresentados nas Figuras 9 a 13 para facilitar a comparação. Quando a linha atinge o vértice, indica que o sistema tem a maior capacidade de tratar o tipo de efluente correspondente a este vértice.

Figura 9 - Águas residuais tratadas por wetlands de fluxo vertical



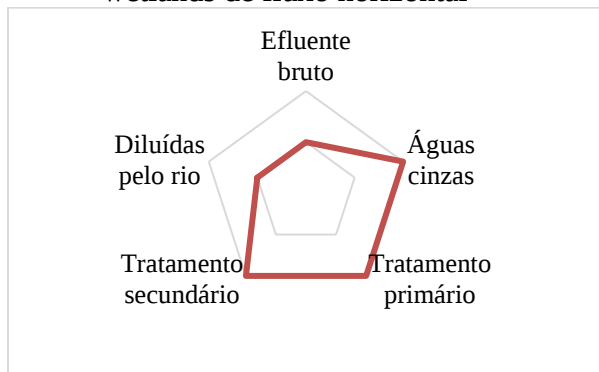
Fonte: Autor, 2024.

Figura 10 - Águas residuais tratadas por wetlands de fluxo vertical francês



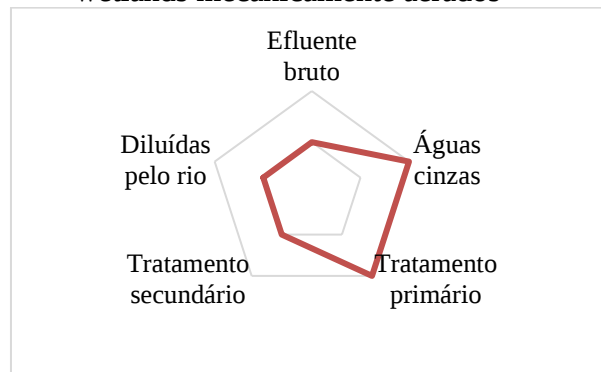
Fonte: Autor, 2024.

Figura 11 - Águas residuais tratadas por wetlands de fluxo horizontal



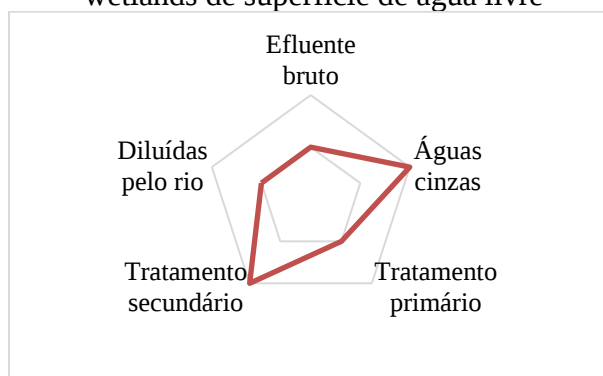
Fonte: Autor, 2024.

Figura 12 - Águas residuais tratadas por wetlands mecanicamente aerados



Fonte: Autor, 2024.

Figura 13 - Águas residuais tratadas por wetlands de superfície de água livre



Fonte: Autor, 2024.

Ao comparar as tecnologias de SBN analisadas, nota-se características distintas e aplicações específicas para cada sistema. Os wetlands de fluxo vertical e os aerados possuem finalidade de tratar tanto águas cinzas, como servir de tratamento primário. Já os wetlands de fluxo horizontal, apresentam uma maior versatilidade, podendo lidar com estes mesmos efluentes, mas também funcionar como um sistema para tratamento secundário.

Os wetlands de superfície de água livre podem ser empregados para o tratamento de águas cinzas ou como complementos em sistemas híbridos, combinados com outros tipos de wetlands ou lagoas de estabilização, para realizar o tratamento secundário. Como alternativa de tratamento de efluente bruto, o wetland de fluxo vertical francês pode ser utilizado, removendo sólidos suspensos, matéria orgânica e realizando, parcialmente, a nitrificação. Posteriormente, é seguido de um segundo estágio para polimento, complementando a remoção de matéria orgânica e maior eficiência na remoção de nitrogênio.

Por outro lado, os canteiros de tratamento de lodo têm uma finalidade distinta, pois não se destinam ao tratamento de efluente líquido. Consequentemente, não se aplica à esta tabela e figuras.

A análise das variadas tecnologias mostra como cada tipo solução possui características que os tornam mais adequados para diferentes contextos e finalidades.

5.1.2. Eficiência de tratamento

Para comparação da eficiência de tratamento entre as tecnologias escolhidas, foram analisadas oito principais características, sendo o requisito de área per capita, eficiência de remoção de DQO, DBO, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, fósforo total, sólidos suspensos totais e coliformes fecais. No Quadro 6 são apresentados os valores de eficiência de tratamento para cada parâmetro citado.

Quadro 6 - Eficiência de tratamento pelas SBN selecionadas

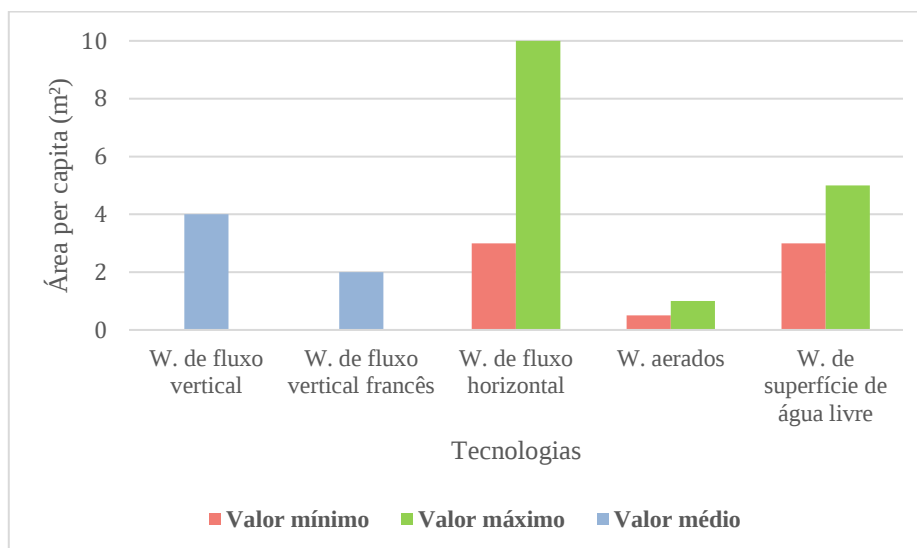
Índice	Tecnologia	Eficiência de tratamento								
		Requisito de área (m ²) per capita	Solução doméstica	DQO (%)	DBO (%)	Nitrogênio total (%)	NH ₄ -N (%)	Fósforo total (%)	Sólidos suspensos totais (%)	Coliformes fecais
9	Wetlands de fluxo vertical	4	Sim	70 - 90	83	20 - 40	80 - 90	10 - 35	80 - 90	≤ 2 - 4 log
10	Wetlands de fluxo vertical francês	2	Sim	>90	93	20 - 60	60 - 90	10 - 22	>90	-
12	Wetlands de fluxo horizontal	3 – 10	Sim	60 - 80	65	30 - 50	20 - 40	10 - 50	>75	-
13	Wetlands aerados	0,5 – 1	Sim	>90	98	15 - 60	>90	20 - 30	80 - 95	≤ 2 - 3 log
16	Wetlands de superfície de água livre	3 - 5	-	41 - 90	54	30 - 80	73	27 - 60	78	-
20	Canteiros de tratamento de lodo	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Cross *et al.*, 2021; Wetlands Blog, 2023a; U.S. EPA, 2000a.

Os dados do Quadro 6 foram utilizados para apresentar em formato de gráfico de coluna (Figuras 14 a 20), com cada gráfico representando um parâmetro, exceto coliformes fecais. Esses gráficos exibem os valores médios, mínimos e máximos apresentados na literatura, proporcionando uma comparação visual dos dados.

Os canteiros de tratamento de lodo não foram aplicados a estes parâmetros, pois seu foco está no tratamento de lodo e não de efluente líquido.

Figura 14 - Requisito de tamanho por população equivalente por SBN



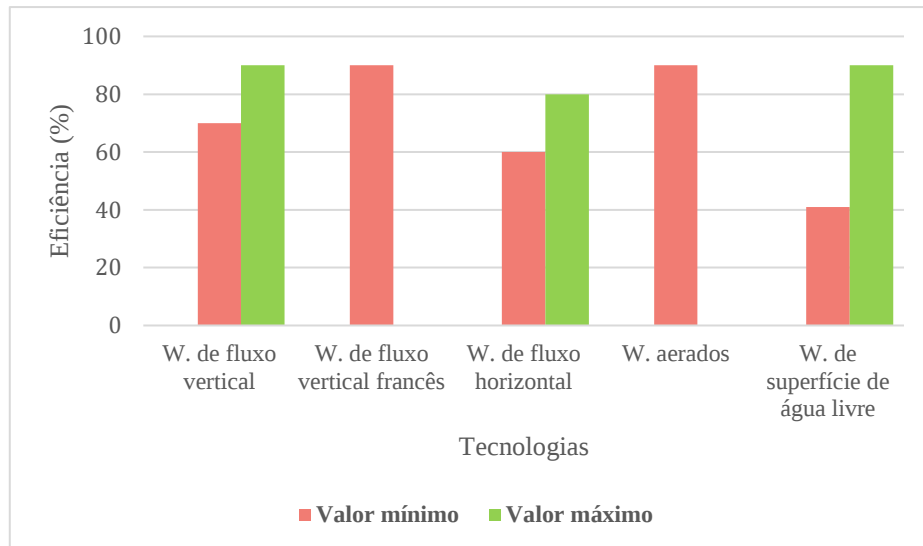
Fonte: Autor, 2024.

O requisito de área por população equivalente (Figura 14), destaca as variações na demanda de espaço entre os sistemas. Os wetlands aerados apresentam a menor área necessária, variando de 0,5 a 1 m² por habitante, deixando evidente seu potencial para aplicação em locais onde o espaço é limitado. Já os wetlands de fluxo vertical francês também se mostram compactos, com uma demanda média de 2 m² por habitante.

Os wetlands de fluxo vertical, com uma demanda de 4 m² por habitante, e os wetlands de superfície de água livre, entre 3 e 5 m² por habitante, ocupam uma posição intermediária em termos de espaço necessário.

Por outro lado, os wetlands de fluxo horizontal apresentam a maior variação, exigindo entre 3 e 10 m² por habitante, dependendo do layout e eficiência sistema, o que pode limitar sua aplicação em áreas com restrição de espaço. Por isso, se faz importante selecionar a tecnologia de SBN considerando o contexto espacial de cada aplicação.

Figura 15 - Eficiência na remoção de DQO por SBN



Fonte: Autor, 2024.

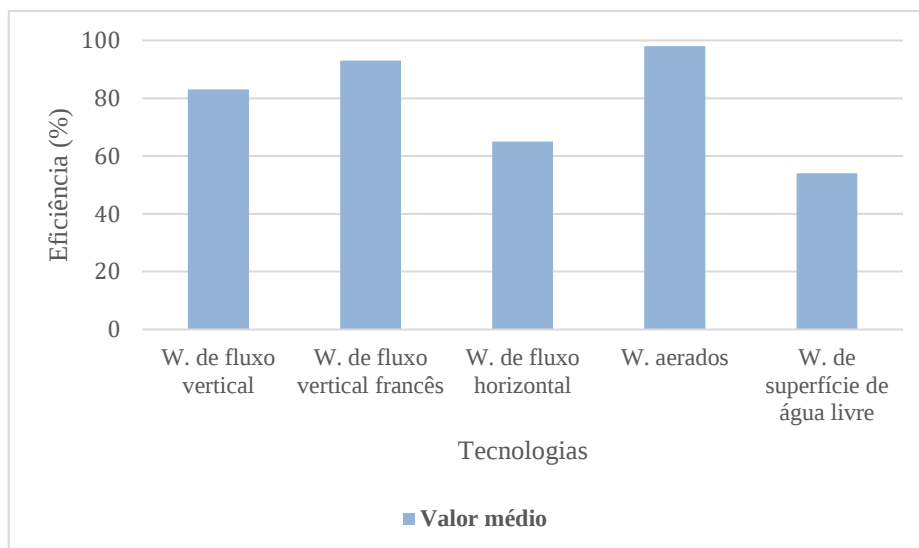
A Figura 15 retrata sobre a eficiência na remoção de DQO pelas diferentes tecnologias de SBN, ficando evidente as variações no desempenho dos sistemas. Os wetlands aerados e os wetlands de fluxo vertical francês se destacam com eficiência mínima de 90%, assim tendo um elevado desempenho na remoção de matéria orgânica dissolvida.

Os wetlands de fluxo vertical também apresentam bons resultados, com remoção variando entre 70% e 90%. Já os wetlands de fluxo horizontal apresentam eficiência entre 60% e 80%, dependendo das condições que influenciam o desempenho, como o clima, solo, elementos biológicos e a qualidade das águas residuais.

Por fim, os wetlands de superfície de água livre possuem uma variação muito grande, com eficiências entre 41% a 90%. Um dos motivos está relacionada com a eficiência de fluxo hidráulica, visto que estes sistemas tendem a ser menos eficientes em comparação com sistemas de fluxo subsuperficial horizontal, por exemplo (KADLEC, 2009).

Analisando os dados, para aplicações que exigem alta eficiência na remoção de DQO, os wetlands aerados e os de fluxo vertical francês seriam as melhores opções, seguidos pelos wetlands de fluxo vertical.

Figura 16 - Eficiência na remoção de DBO por SBN



Fonte: Autor, 2024.

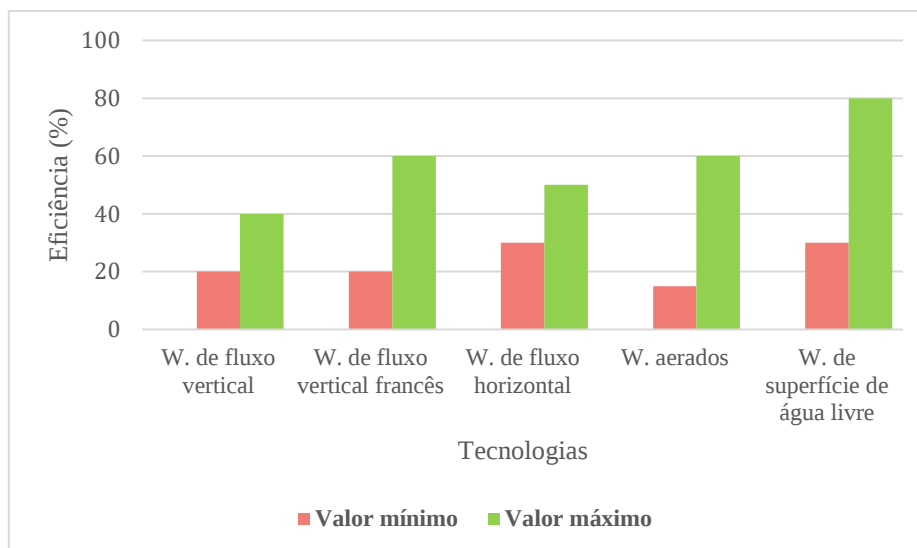
A eficiência na remoção de DBO é apresentada pela Figura 16, em que os wetlands aerados alcançam o maior valor médio de eficiência, com 98% de remoção, o que os torna recomendados para situações em que o efluente possui alta carga orgânica, ou onde há necessidade de elevados padrões de qualidade no tratamento de efluentes.

Os wetlands de fluxo vertical francês também apresentam alto desempenho, com 93% de remoção, e os wetlands de fluxo vertical mostram eficiência de 83%, alternativas essas que podem ser aplicadas, inclusive, em situações com restrições de área ou recursos.

Com 65% de eficiência, os wetlands de fluxo horizontal costumam ser utilizados em complementação a outros sistemas ou em situações que a carga orgânica não seja muito elevada, assim como os wetlands de superfície de água livre, com eficiência de 54%.

Em situações que exigem alta remoção de DBO, os wetlands aerados e os de fluxo vertical francês são as tecnologias que melhor desempenham entre as analisadas. Já os wetlands de superfície de água livre podem ser usados como etapas de polimento ou para valorizar os co-benefícios ambientais.

Figura 17 - Eficiência na remoção de nitrogênio total por SBN



Fonte: Autor, 2024.

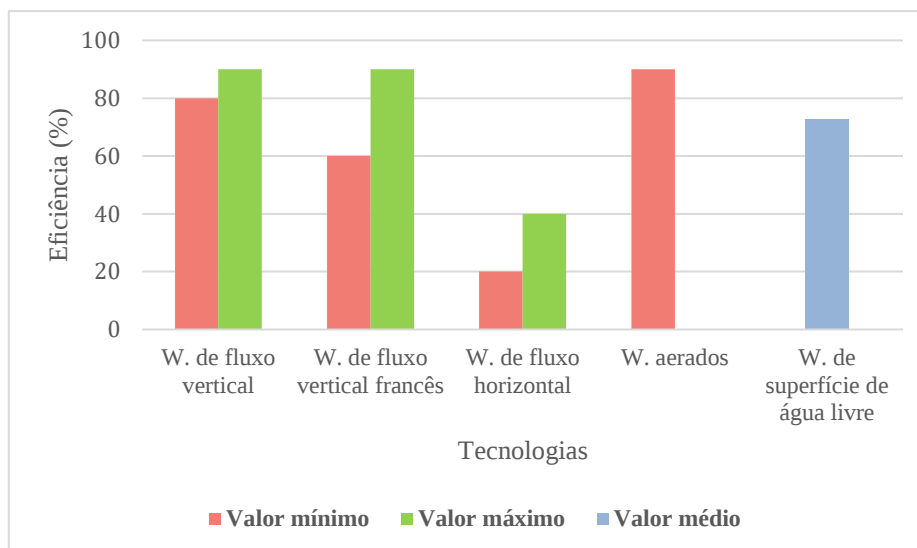
A Figura 17 é retratada com a comparação de eficiência na remoção de nitrogênio total pelas diferentes tecnologias baseadas na natureza, deixando claro a grande variação de desempenho. Os wetlands de superfície de água livre apresentam a maior faixa de eficiência, variando entre 30% e 80%, devido à maior exposição da água à vegetação e ao ar, o que os tornam uma boa alternativa em cenários que permitem maior área e tempo de detenção.

Alguns apresentaram um desempenho intermediário, como os wetlands de fluxo horizontal, com eficiência entre 30% e 50%, os wetlands de fluxo vertical francês, com uma faixa de 20% a 60%, e os wetlands aerados, com eficiência variando entre 15% e 60%, dependendo da intensidade da aeração para alcançar melhores resultados.

Como menor desempenho, estão os wetlands de fluxo vertical, com eficiência variando de 20% a 40%. A remoção de nitrogênio total, neste sistema, possui limitações devido às limitações de condições aeróbicas para nitrificação (DOTRO *et al.*, 2017).

A seleção da tecnologia mais adequada para a remoção de nitrogênio total depende de uma série de fatores, como a vegetação, tipo de solo e as condições climáticas.

Figura 18 - Eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) por SBN



Fonte: Autor, 2024.

A eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) é mostrada na Figura 18, em que os wetlands de fluxo vertical e wetlands aeradas se destacam, com uma eficiência entre 80% e 90%, e maior que 90%, respectivamente. Esta alta eficiência é atribuída à elevada oxigenação do meio, favorecendo a nitrificação, processo em que o nitrogênio amoniacal é convertido em nitrito e, posteriormente, em nitrato.

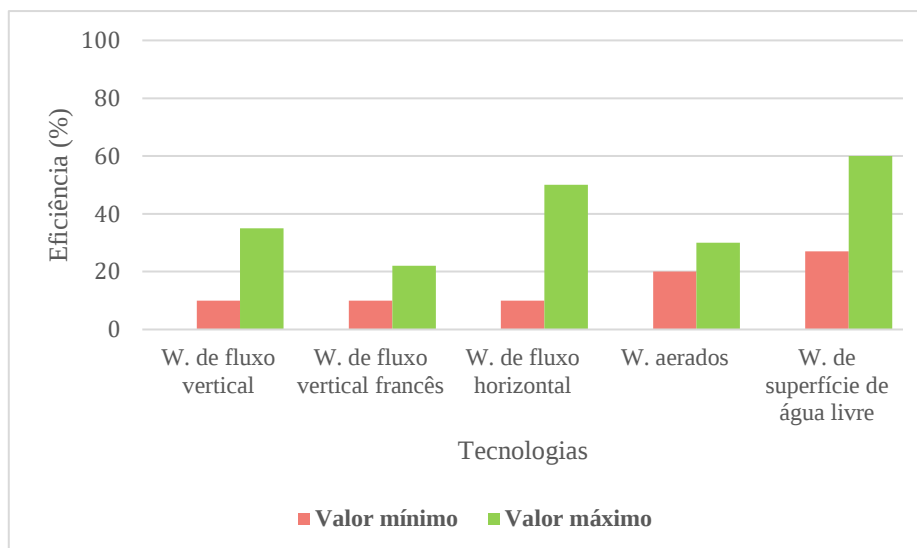
Os wetlands de fluxo vertical francês também apresentam um bom desempenho, variando de 60% a 90%, em que, esta variação pode ser influenciada pela carga hidráulica e orgânica.

Os wetlands de superfície de água livre apresentam uma eficiência de 73%, sendo assim, uma eficiência intermediária em comparação às outras tecnologias, visto que sua taxa de nitrificação pode ser limitada devido a interação entre processos aeróbicos e anaeróbicos no meio.

Por outro lado, os wetlands de fluxo horizontal mostram uma eficiência significativamente inferior, entre 20% e 40%. Este baixo desempenho pode ser atribuído à limitação de oxigênio, o que reduz a atividade nitrificante.

Analisando as tecnologias, é nítido como a eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal está diretamente relacionada à disponibilidade de oxigênio no meio, principalmente.

Figura 19 - Eficiência na remoção de fósforo total por SBN



Fonte: Autor, 2024.

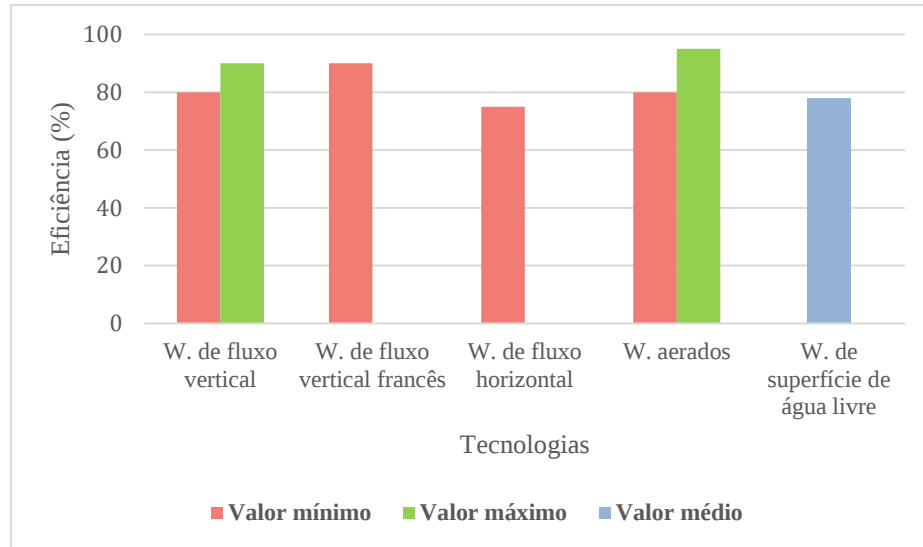
Na comparação entre as tecnologias, apresentada pela Figura 19, há uma semelhança na eficiência de remoção de fósforo nos wetlands de fluxo vertical, com eficiência entre 10% e 35%, e os wetlands de fluxo vertical francês, variando entre 10% e 22% da capacidade de remoção.

Os wetlands de fluxo horizontal mostram uma maior amplitude na eficiência, com remoção entre 10% e 50%, dependendo da precipitação química, adsorção em partículas do substrato, assimilação realizada pelas plantas e pelos biofilmes que se formam no substrato e nas raízes das macrófitas (SOUZA *et al.*, 2004).

A SBN de wetlands aerados apresentou uma faixa de 20% a 30% de eficiência. Embora a aeração otimize a remoção de nitrogênio, ela mostrou-se ter limitação na remoção de fósforo, por ser um nutriente que também depende de outros processos físico-químicos.

Os melhores resultados foram obtidos nos wetlands de superfície de água livre, com eficiência entre 27% e 60%, variando de acordo com o layout do sistema e as plantas utilizadas.

Figura 20 - Eficiência na remoção de sólidos suspensos totais por SBN



Fonte: Autor, 2024.

A eficiência na remoção de sólidos suspensos totais (SST) varia significativamente entre as diferentes soluções, como mostra a Figura 20, de acordo com as características físicas dos sistemas.

Os wetlands de fluxo vertical e os wetlands aerados apresentam uma alta eficiência, ficando na faixa de 80% a 90%, e 80% a 95% respectivamente. O fluxo vertical favorece a sedimentação e a filtração das partículas pelo substrato, e as camadas com diferentes granulometrias aumenta a retenção. A aeração presente no sistema aerado mecanicamente promove a agregação de partículas e a sedimentação posteriormente.

Nos wetlands de fluxo vertical francês, a eficiência pode ultrapassar 90%, visto que estes sistemas são projetados para receber efluentes brutos, sendo necessário uma alta capacidade de retenção dos sólidos suspensos.

Os sistemas de wetlands de fluxo horizontal apresentam eficiência superior a 75%, e a remoção destas partículas pelos sistemas de wetlands de superfície de água livre são limitadas pela ausência de um substrato para realizar a filtração, apresentando uma eficiência média de 78%.

As diferenças entre as SBN estão nos seus mecanismos de funcionamento. Enquanto os wetlands de fluxo vertical e francês dependem da filtração através do substrato, o sistema de superfície de água livre são mais influenciados pelo tempo de residência hidráulico e pela sedimentação.

A eficiência na remoção de coliformes fecais foi avaliada apenas para os wetlands de fluxo vertical, que apresentou uma eficiência de remoção entre ≤ 2 e 4 log, o que os torna

bastante eficazes na redução de patógenos, e os wetlands aerados, com uma eficiência um pouco inferior, variando entre ≤ 2 e 3 log.

Os resultados obtidos, baseados nos estudos de Cross *et al.* (2021), Wetlands Blog (2023a) e U.S. EPA (2000a; 2000b), mostram como a eficiência de remoção de poluentes entre as tecnologias selecionadas variam.

A análise da eficiência das diferentes SBN para o tratamento de efluentes líquido mostra como cada solução possui vantagens para alguns parâmetros, e limitações para outros, mas em geral, os wetlands de fluxo vertical francês e os wetlands aerados foram os que mais se destacaram, pela alta eficiência na maioria dos parâmetros, especialmente na remoção de DBO, DQO e sólidos suspensos totais. Entretanto, com baixas eficiências na remoção de fósforo total.

Por outro lado, tecnologias como os wetlands de fluxo horizontal e os wetlands de superfície de água livre apresentaram desempenhos abaixo das outras, porém, com maior eficácia na remoção de nitrogênio total e fósforo total.

A escolha da tecnologia a ser implantada depende de fatores como espaço disponível, tipo de efluente, qualidade final necessária do efluente e objetivos ambientais, não apenas o sistema com maior eficiência.

5.1.3. Co-benefícios das SBN

As tecnologias analisadas também geram benefícios além do tratamento de efluentes, são os benefícios ao meio ambiente, chamados então de co-benefícios, e apresentados no Quadro 7, podendo ter uma alta, média ou baixa influência na biodiversidade da fauna e flora local, servir como regulador de temperatura, mitigar enchentes e tempestades, fazer o sequestro de carbono atmosférico, produzir biomassa, apresentar um valor estético, ser um ambiente de recreação, suas plantas possibilitarem a polinização, se o efluente tratado permite o reuso, e a produção de biossólidos para utilizar na agricultura como um fertilizante.

Quadro 7 - Co-benefícios das SBN selecionadas

Índice	Tecnologia	Co-benefícios (A, alto; M, médio; B, baixo)												
		Biodiversidade (Fauna)	Biodiversidade (Flora)	Regulação de temperatura	Mitigação de enchentes	Mitigação de tempestade	Sequestro de carbono	Produção de biomassa	Valor estético	Recreação	Polinização	Fonte de alimentos	Reúso de água	Biossólidos
9	Wetlands de fluxo vertical	M	B				B	M	B	B			A	
10	Wetlands de fluxo vertical francês	M	B				B	M	B	B			A	A
12	Wetlands de fluxo horizontal	M	B			A	B	M	B	B			A	
13	Wetlands aerados	B	B				B	M	B	B			A	
16	Wetlands de superfície de água livre	A	A	B	M		M	A	A	M	M		A	
20	Canteiros de tratamento de lodo	M	B				B	M	B	B			A	A

Fonte: Adaptado de Cross *et al.*, 2021.

Os co-benefícios associados às tecnologias das SBN, presentes no Quadro 7, foram representados por gráficos de radar nas Figuras 21 a 26, nos quais a intensidade do benefício será maior quanto mais a linha estiver próxima do vértice, indicando uma maior influência do sistema em relação ao co-benefício ambiental correspondente. Cada sistema demonstrou vantagens, deixando claro como estas soluções vão além do tratamento de efluentes. No caso da biodiversidade (fauna e flora), os wetlands de superfície de água livre se destacaram, pois proporcionam habitats que favorecem a preservação de espécies. Esses sistemas foram os únicos que apresentaram dados de influência na regulação de temperatura e na mitigação de enchentes, embora em níveis baixos e médio, respectivamente.

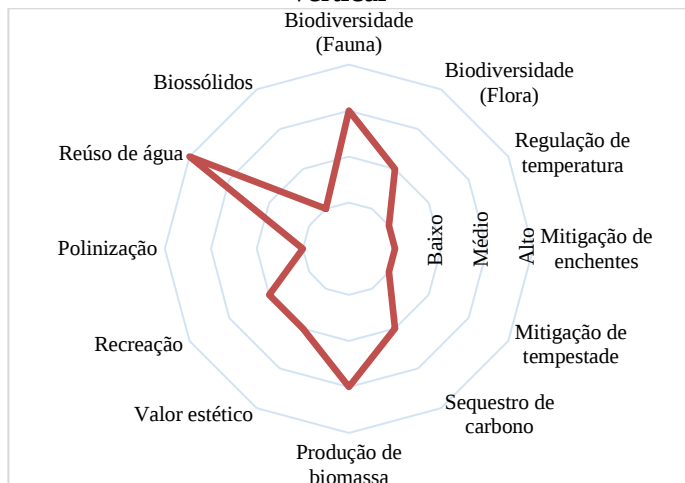
Em relação à mitigação de tempestades, os wetlands de fluxo horizontal foram os únicos com dados disponíveis, mostrando um co-benefício alto nessa área. Quanto ao sequestro de carbono e à produção de biomassa, mais uma vez, os wetlands de superfície de água livre sobressaíram como a tecnologia mais eficiente. Além disso, seu valor estético e o potencial para área de recreação os fazem interessantes para projetos que valorizem aspectos visuais e de lazer.

A polinização, ainda que com dados apenas de um sistema, também possui uma contribuição média dos wetlands de superfície de água livre. No que diz respeito a fonte de alimentos, nenhum dos sistemas escolhidos apresentaram algum tipo de co-benefícios, estando mais relacionado aos wetlands naturais (pântanos), sistemas de aquaponia e hidroponia, mas que não estão no escopo do estudo.

O reuso de efluente tratado é algo que todas tecnologias possuem capacidade, gerando um alto co-benefício ambiental. Por fim, os canteiros de tratamento de lodo e os wetlands de fluxo vertical francês se destacaram pela capacidade de gerar biossólidos de alta qualidade, podendo ser utilizados como fertilizantes naturais.

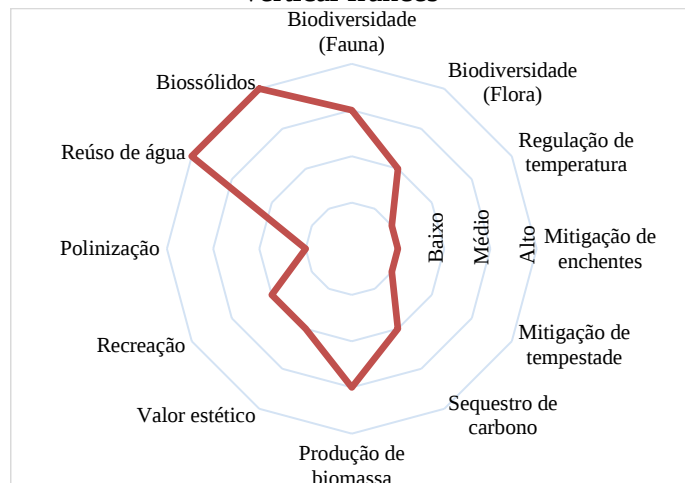
Essa análise mostra a variedade de funções que os SBN podem desempenhar, indo além de seu propósito mais estudado, e reforça a mesma ideia da análise de eficiência, em que é importante considerar aspectos que vão além do desempenho para remover matéria orgânica.

Figura 21 - Co-benefícios dos wetlands de fluxo vertical



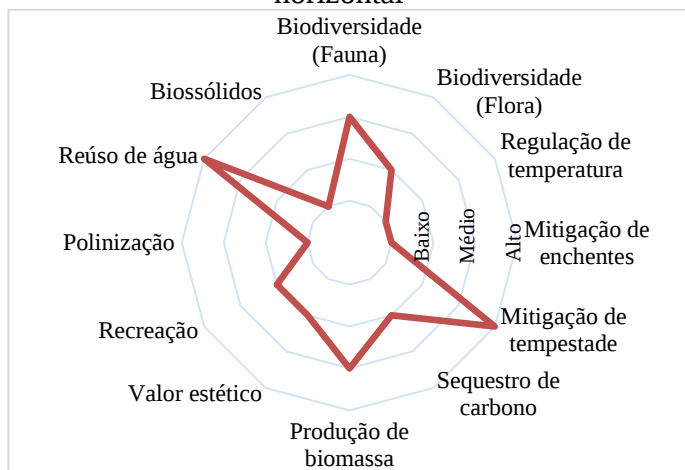
Fonte: Autor, 2024.

Figura 22 - Co-benefícios dos wetlands de fluxo vertical francês



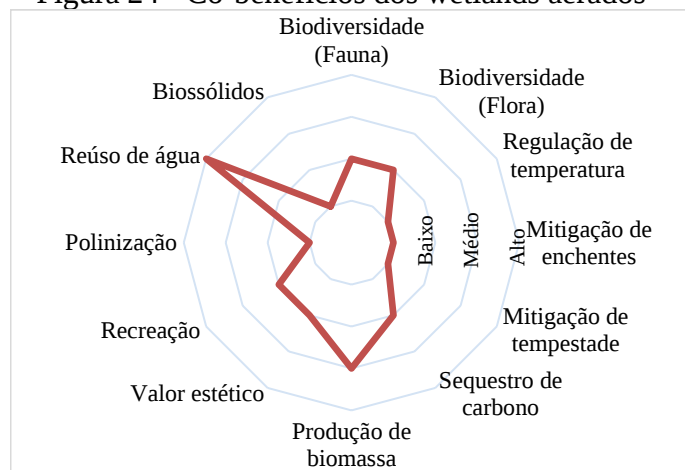
Fonte: Autor, 2024.

Figura 23 - Co-benefícios dos wetlands de fluxo h. horizontal



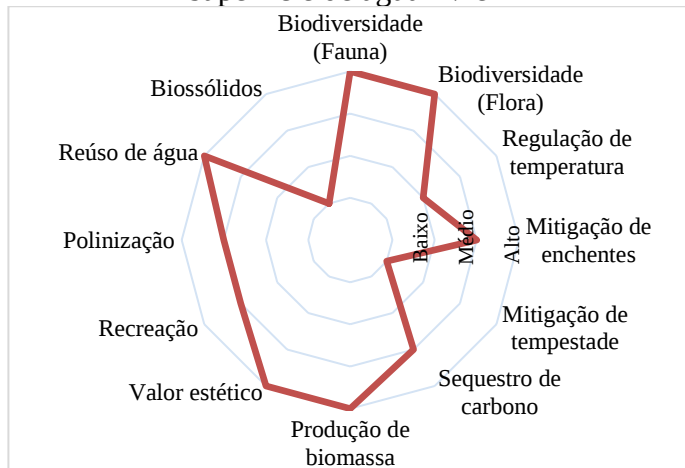
Fonte: Autor, 2024.

Figura 24 - Co-benefícios dos wetlands aerados



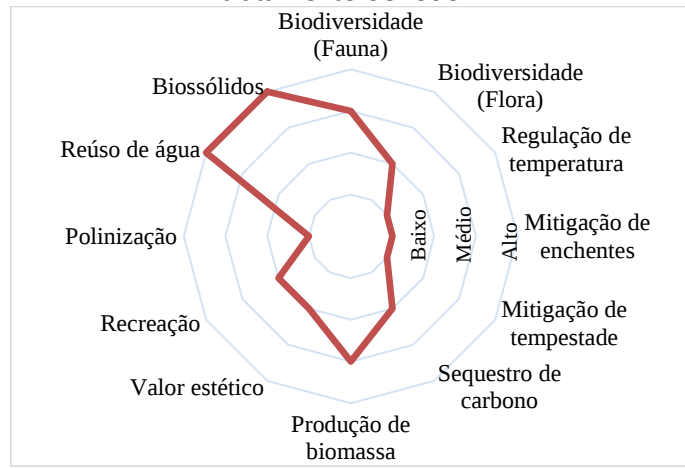
Fonte: Autor, 2024.

Figura 25 - Co-benefícios dos wetlands de superfície de água livre



Fonte: Autor, 2024.

Figura 26 - Co-benefícios dos canteiros de tratamento de lodo



Fonte: Autor, 2024.

5.1.4. Discussão

As análises revelaram que nenhuma tecnologia se sobressai em todos os aspectos, mas cada uma possui vantagens que podem ser exploradas e adaptadas para diferentes contextos.

Os wetlands aerados, embora demandem maior consumo energético, e os wetlands de fluxo vertical francês, são mais indicadas em situações que exigem alta eficiência na remoção de matéria orgânica, nitrogênio amoniacal e sólidos suspensos, em contrapartida, possuem os co-benefícios médios, entre os sistemas analisados, enquanto que os wetlands de superfície de água livre podem ocupar um espaço maior, ter um desempenho abaixo nestes parâmetros, mas foi a tecnologia que apresentou maior destaque com os co-benefícios ambientais capazes de gerar.

Esta integração dos dados quantitativos e qualitativos, utilizando elementos gráficos, facilitou a comparação e identificar as semelhanças entre os sistemas, assim, a escolha ideal da tecnologia como soluções sustentáveis, que dependem do contexto de aplicação e dos objetivos do projeto.

5.2. RESPOSTAS E DEPOIMENTOS

5.2.1. Especialistas

5.2.1.1. Pablo Heleno Sezerino - Especialista em tratamento de efluentes

Pablo Heleno Sezerino, professor universitário pela Universidade Federal de Santa Catarina especializado em tratamento de efluentes, destacou os wetlands construídos como a tecnologia de SBN mais eficiente e consolidada para o tratamento de efluentes descentralizados, como citado em seu livro “Wetlands Construídos como Ecotecnologia para o Tratamento de Águas Residuárias: Experiências Brasileiras”, de 2021. Ele considera que as SBN possuem tecnologias de baixo custo operacional, sendo uma vantagem significativa frente aos sistemas convencionais de tratamento. A literatura sobre wetlands corrobora essa visão, afirmando que estes sistemas possuem menor consumo de energia e demandam menos insumos químicos, o que reduz os custos ao longo do tempo, especialmente em regiões com recursos limitados e altas variações de carga de efluentes.

Em relação aos desafios para a maior aceitação e implementação das SBN no Brasil, Pablo acredita que a falta de conhecimento sobre essas tecnologias seria o principal aspecto,

mostrando que há uma lacuna de conhecimento entre pesquisadores e população em geral. Essa distância com as SBN gera uma percepção limitada, ou até mesmo equivocada, de sua eficácia e segurança, tornando a conscientização pública e o incentivo fiscal à adoção destes sistemas uma prioridade.

Sezerino também destacou que o monitoramento da qualidade do efluente tratado em tempo real poderia ser uma inovação tecnológica promissora para o setor. Trabalhos como a dissertação de mestrado de Monteiro (2020) e o trabalho de conclusão de curso de Silva (2022) focaram no desenvolvimento de equipamentos que monitorem a qualidade da água em tempo real, portanto, essa inovação já está sendo estudadas, mas ainda não foram implementadas na prática. Esse tipo de monitoramento permite uma avaliação contínua da eficiência dos sistemas de SBN, possibilitando testes, rápidos ajustes e o aumento da confiabilidade dos sistemas.

Por fim, Sezerino sugere que o edital de contratação de uma ETE deveria especificar tanto os custos de implantação (CAPEX), quanto os de operação (OPEX), para permitir a análise de onde está o maior gasto, o que poderia ser estudado para diminuir custos, com isso, as SBN poderiam ganhar mais notoriedade.

5.2.1.2. *Vanessa - Especialista em vigilância em saúde e em saúde ambiental*

O questionário respondido por Vanessa, Engenheira Sanitarista e Ambiental da Vigilância Sanitária de Florianópolis, com especialização em vigilância em saúde e saúde ambiental, trouxe uma percepção de alguém que trabalha há 18 anos, e viu pouco a respeito de SBN por parte da prefeitura e para aprovação de projetos em seu trabalho.

No depoimento, foi apontado as wetlands como a tecnologia de SBN mais eficiente e consolidada para o tratamento de efluentes domésticos descentralizados e destacou que, um dos principais benefícios das SBN em comparação aos sistemas convencionais, seria o menor consumo de energia elétrica.

Um dos pontos centrais mencionados foi a falta de conhecimento sobre as tecnologias SBN. Essa é uma barreira que reflete uma lacuna na disseminação de informações técnicas e na formação de profissionais que possam projetar, implementar e operar esses sistemas. Como uma medida para melhorar a divulgação e promover a adoção dessas soluções, foi desenvolvida a norma ABNT - NBR 17076:2024, que estabelece diretrizes para o projeto de sistemas de tratamento de esgoto de menor porte, incluindo, especificamente, tecnologias como os wetlands. Essa norma pode representar um passo importante para aumentar a implementação em novas unidades, oferecendo orientações para sua aplicação prática.

As questões relacionadas à operação e manutenção foram citadas como desafios importantes para a implementação das SBN, em que, diferentemente dos sistemas convencionais, as SBN exigem um entendimento técnico específico para garantir a eficiência contínua, o que pode desestimular sua adoção.

Para incentivar a adoção de SBN, uma abordagem que envolve maior divulgação e participação de engenheiros sanitaristas e ambientais na elaboração de projetos seria de grande importância. Atualmente, ela observa que a área de projetos de tratamento de efluentes descentralizados é dominada por arquitetos e engenheiros civis, que hesitam em inovar devido ao medo de reprovação dos projetos ou pela falta de conhecimento com as tecnologias SBN.

Vanessa comentou dois exemplos de SBN que foram implementados, um no Corporate Park, e outro no Sapiens Park, onde era feito o reuso de efluentes tratados, no entanto, esses sistemas foram desligados e conectados à rede convencional, reforçando a questão dos desafios enfrentados na operação e manutenção.

5.2.1.3. *Heike Hoffmann – Especialista em saneamento sustentável e processo de tratamentos*

A microbiologista Heike Hoffmann, doutora em Ecologia e especializada em Saneamento Sustentável, destacou que os diferentes tipos de wetlands oferecem diversas possibilidades de aplicação, em que a escolha da tecnologia depende das exigências quanto à qualidade do efluente tratado, da área disponível e do número de usuários a serem atendidos.

Heike destacou como principais benefícios das SBN sua alta capacidade de absorver variações de carga e vazão, com uma alta taxa de infiltração por parte do material no solo, e menores custos de operação e manutenção, visto que a operação é esporádica, possuem menor dependência de energia elétrica e produtos químicos, favorecendo a viabilidade econômica a longo prazo.

Sobre os desafios de aceitação e implementação das SBN no Brasil, Heike acredita que são diversos os motivos. Em primeiro lugar, a falta de conhecimento sobre essa opção, tanto entre gestores quanto na população em geral, o que dificulta a compreensão de suas vantagens e limita a adoção ampla desses sistemas. Outro motivo seria a ausência de conhecimento técnico específico, representando um desafio para a aceitação das SBN, uma vez que não sabem de sua eficiência, e preferem continuar adotando os métodos tradicionais. Os custos iniciais de implementação, quando comparados aos dos sistemas mais usuais, como fossa séptica seguida de filtro anaeróbio e sumidouro, também podem ser uma barreira.

Heike comentou que o reuso de efluentes tratados por SBN no Brasil enfrenta diversas limitações, como barreiras regulatórias, que incluem a falta de normativas específicas para reuso e, principalmente, a ausência de incentivos. Ela exemplificou que os condomínios poderiam precisar ter uma área verde, e essa área poderia ser declarada com os wetlands, fazendo com que o tratamento de efluentes deixasse de ser uma área considerada inutilizável. Outra questão seria que muitos usuários ainda têm receio de utilizar efluentes tratados para fins agrícolas, industriais ou até residenciais, mesmo que não potáveis, devido a preconceitos ou falta de conhecimento sobre a segurança desse reuso. Heike acrescenta ainda que, há a questão da demanda por nitrogênio, que influencia a viabilidade do reuso em determinadas aplicações, como na agricultura.

Em relação a inovações tecnológicas, Hoffmann identifica o wetland tipo "Filtro Francês" como promissor para pequenos municípios, devido à sua eficácia no manejo de lodos e à necessidade reduzida de intervenções complexas. Este tipo de wetland destaca-se pela simplicidade de operação, podendo receber o efluente bruto, e possui capacidade de remover sólidos e nutrientes com menor consumo de energia e recursos, o que o torna uma opção atrativa.

5.2.1.4. *André Aguiar Battistelli - Especialista em tratamento de efluentes*

André Aguiar Battistelli, especialista em Tratamento de Efluentes, comentou sobre a crescente relevância das SBN, especificamente os wetlands, para o tratamento descentralizado de efluentes domésticos, considerando-os "interessantes e em consolidação". Ao comparar com sistemas convencionais, André menciona quatro principais benefícios das SBN: eficiência na remoção de poluentes, possibilidade de recuperação de recursos, baixo custo de implantação e operação, e facilidade de se adaptar com a tecnologia. Contudo, ele acredita que o que limita a expansão dessas soluções no Brasil seria a falta de conhecimento dessa alternativa.

Um avanço recente muito importante, segundo Battistelli, é a introdução da norma ABNT NBR 17076:2024, apresentando os sistemas como wetlands e vermifiltros como soluções baseadas na natureza para o tratamento de efluentes. Contudo, André acredita que ainda são necessárias outras iniciativas para a disseminação dessa tecnologia, como o incentivo à pesquisa, projetos de extensão universitária, capacitação de profissionais e gestores que possam atuar como multiplicadores, parcerias entre instituições públicas e privadas, e campanhas de conscientização para a população sobre os benefícios e a importância das SBN.

Quanto a inovações tecnológicas, André comenta que a integração de SBN com novas tecnologias de reuso, recuperação de recursos e o desenvolvimento de sensores para monitoramento em tempo real, seriam avanços fundamentais. Os sensores seriam capazes de manter um controle contínuo da qualidade dos efluentes, para que estejam em conformidade com os padrões de tratamento. Ele também propõe o uso de modelagem computacional e simulações para testar diferentes configurações de SBN em condições reais, ajudando as futuras implantações.

5.2.1.5. *Catiane Pelissari - Especialista em tratamento descentralizado de esgoto*

A professora pela Universidade do Oeste de Santa Catarina, Catiane Pelissari, especialista em tratamento descentralizado de esgoto, quando perguntada qual SBN considera mais eficiente e consolidada para o tratamento de efluentes domésticos descentralizados, ela comentou sobre os sistemas de wetlands construídos e que os principais benefícios desta tecnologia seria a qualidade do efluente tratado que os wetlands são capazes de atingir.

Catiane identifica um dos principais desafios para a implementação das SBN no Brasil seria a necessidade de que a operação e manutenção do sistema esteja na mão do morador, que deveria ser capacitado para manter o sistema em funcionamento, e como descreveu no livro *Wetlands Construídos como Ecotecnologia para o Tratamento de Águas Residuárias: experiências brasileiras*, Sezerino e Pelissari, 2021, a manutenção é um fator de influência no desempenho desses sistemas.

Em relação ao reuso do efluente tratado, as regulamentações atuais acabam limitando esta prática, comentou Catiane, e seria importante que políticas públicas contribuíssem para avançar na normatização e incentivar o uso das SBN. É uma recomendação comum entre especialistas, que acreditam que regulamentações específicas poderiam facilitar a expansão desses sistemas.

5.2.1.6. *Gabriel Rodrigues Vasconcellos - Especialista em saneamento e wetlands construídos*

O engenheiro ambiental e sanitarista Gabriel Rodrigues Vasconcellos, especialista em saneamento e wetlands construídos, destacou como as SBN oferecem um sistema de baixo custo e de fácil operação, assim sendo uma alternativa para comunidades e locais onde recursos

financeiros e técnicos possam ser limitados, entretanto, há a barreira da falta de conhecimento desta opção, relatada por Gabriel, limitando a expansão destas tecnologias

Outro ponto levantado por Vasconcellos é a falta de conhecimento, novamente, mas agora acerca do reuso dos efluentes tratados por SBN. Uma medida sugerida para que as políticas públicas brasileiras pudessem evoluir para incentivar a adoção de SBN no Brasil seria com a implementação de sistemas de tratamento de esgoto de baixa emissão de carbono, trazendo assim o valor das SBN e incentivando, indiretamente, o seu uso.

Quanto às inovações tecnológicas que podem impulsionar estas soluções baseadas na natureza, Vasconcellos acredita que as universidades possuem grande importância, com suas pesquisas e projetos para o desenvolvimento e aprimoramento das SBN.

5.2.1.7. *Ênio Leandro Machado - Especialista em tratamento de efluentes, tecnologias limpas e análise/avaliação do ciclo de vida*

O professor Ênio Leandro Machado, químico industrial e doutor em Engenharia com especialização em Tecnologias Limpas e Avaliação do Ciclo de Vida, vê nos wetlands construídos e na anaerobiose (como tanques sépticos e biofiltros) as tecnologias mais eficientes e consolidadas para o tratamento de efluentes domésticos no lote.

Para Ênio, as SBN têm a capacidade de potencializar a economia circular, mesmo que seja em pequena escala, considerando a possibilidade de recuperação de nutrientes, a fixação de CO₂, juntamente com a pegada hídrica reduzida e a possibilidade de uso de materiais acessíveis, as SBN possibilitam, inclusive, o reuso da água e a valorização do ambiente com seu paisagismo.

Ênio destacou que os usuários não acharam uma alternativa viável, ou até mesmo a falta de conhecimento técnico, como um dos principais desafios para a aceitação e implementação das SBN no Brasil. Como forma de resolver este problema, Machado comenta que deveria tornar-se efetivo o Plano Municipal de Saneamento Básico integrando as pesquisas e técnicos que realmente trabalhem e conheçam as questões do saneamento, alinhando a atuação dos técnicos com os avanços trazidos por pesquisas.

Quanto à inovação, ele acredita que a integração entre saneamento e paisagismo, com foco em conforto ambiental e educação ambiental, pode impulsionar o uso das SBN. A criação de espaços funcionais e com valor estético contribuiria para a aceitação social, divulgação e implementação de SBN em áreas urbanas e rurais.

Por fim, o professor Ênio expressa otimismo em relação ao futuro do saneamento e à relevância das pesquisas contínuas sobre saneamento.

5.2.2. Empresas

5.2.2.1. Empresa 1

O representante da primeira empresa compartilhou a experiência com o uso de uma SBN, especificamente com o uso de um sistema de wetlands para tratamento de efluentes. Ele destacou que o sistema vem atendendo as expectativas de eficiência no tratamento e que não tiveram nenhuma dificuldade na implantação ou manutenção. A escolha por este sistema está relacionada com os objetivos da empresa, bem como a simplicidade e robustez da operação.

Quanto aos custos, foi avaliado que o sistema de wetlands é moderadamente mais barato do que alternativas convencionais, como é apontado na literatura como estes sistemas são mais baratos em manutenção e operação por Santos (2019) e Perondi *et al.* (2019).

Ao ser questionado se a empresa faz o reúso de efluente tratado, foi comentado que, apesar de não utilizar a água tratada pelo sistema de wetlands para reúso, a companhia faz o reúso na utilização de água destilada em seu laboratório.

Para o representante, incentivos fiscais e uma legislação que favoreça as tecnologias baseadas na natureza seriam medidas que fariam a diferença na ampliação da adoção das SBN no país, assim como alguns especialistas entrevistados também sugeriram.

5.2.2.2. Empresa 2

A segunda empresa atua com operação, pesquisas e desenvolvimento de ETEs de diferentes capacidades e tecnologias em diferentes municípios. A diretora da companhia explicou que, embora possuam um sistema próprio de tratamento de efluentes em sua sede (um wetland modular), este é utilizado principalmente como parte das soluções que a empresa oferece a seus clientes, além de servir para desenvolvimento e pesquisa interna.

Embora a empresa seja obrigada a possuir um sistema descentralizado para o tratamento de efluentes devido à ausência de rede de esgoto local, foi destacado que o principal benefício do sistema vai além do tratamento dos próprios efluentes, pois também serve para o desenvolvimento de soluções para seus clientes.

Ao avaliar os custos de implementação, a diretora apontou que os sistemas de wetlands podem ser financeiramente iguais ou mais baratos em comparação com tecnologias de eficiência similar. Entretanto, o custo pode variar de acordo com fatores como o valor do metro quadrado do terreno necessário, as perspectivas de crescimento da empresa e as exigências regulatórias. Em locais com limitações de espaço ou terrenos valorizados, soluções mais compactas ou subterrâneas são frequentemente preferidas. A grande vantagem dos wetlands está nos custos operacionais e de manutenção, que, comparando tecnologias de mesma eficiência, a diretora afirma que o sistema de wetlands construídos é, sem dúvida, muito mais econômico.

Também foi mencionado a situação de muitas áreas em Florianópolis, onde predominam fossas rudimentares que podem drenar para redes pluviais, comprometendo a qualidade ambiental local. Neste cenário, os wetlands surgem como uma solução que oferece, no mínimo, “atenção ao tratamento”, garantindo maior eficiência e segurança na remoção de poluentes.

Quando questionada sobre as melhorias necessárias para expandir a adoção de SBN entre as empresas, foi dito que o foco não deve estar na exigência para que cada uma invista em seu próprio sistema, mas sim na fiscalização da eficiência dos sistemas descentralizados já existentes.

Durante uma visita à empresa, observou-se dois sistemas de wetlands para o tratamento de efluentes, sendo um wetland de fluxo vertical com areia para o tratamento de águas cinzas (Figura 27), e outro sistema com wetlands para o tratamento de esgoto bruto (figura 28). Para o tratamento do efluente bruto, foram implantados três wetlands construídos, iniciando com um wetland francês preenchido com brita (etapa 1), que recebe o esgoto bruto, seguido de um wetland de fluxo horizontal com brita (etapa 2) e, finalizando, em um wetland de fluxo vertical com areia (etapa 3) para o polimento final da água. Estas unidades empregam macrófitas no processo de tratamento e operam sem qualquer odor perceptível.

Figura 27 - Wetlands construídos para tratamento de águas cinzas



Fonte: Autor, 2024.

Figura 28 - Wetlands francês para tratamento de efluente bruto



Fonte: Autor, 2024.

A área do wetland francês é dividida em duas zonas que alternam o uso semanalmente, permitindo a recuperação de uma área enquanto a outra está ativa, através de manobras de abertura e fechamento de registros. Quando questionada sobre o impacto das chuvas intensas, relatou-se que o sistema também é projetado para estes eventos, aproveitando o solo de alta infiltração, o que evita problemas como transbordamento.

Em termos de manutenção, o lodo acumulado no wetland francês é removido aproximadamente a cada 10 a 15 anos, um intervalo que demonstra a baixa necessidade de intervenções frequentes. Após a extração, esse lodo pode ser reutilizado em outras aplicações, como fabricação de bio solo ou tijolos ecológicos (SILVA *et al.*, 2021).

5.2.2.3. Empresa 3

A presidente da instituição destacou a importância da adoção de um sistema de tratamento de efluentes baseado em natureza, especificamente um wetland vertical de areia, que possuem na instituição para atender 70 pessoas. Segundo ela, a decisão pela instalação do sistema foi motivada pela necessidade de uma alternativa à fossa séptica, que não suportava mais a demanda. Sabendo disso, alunos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) contribuíram com uma doação, presenteando a instituição com a instalação da SBN para tratamento de efluentes em 2010.

Embora a empresa não obtenha benefícios econômicos com a adoção da SBN, devido à isenção de impostos, a implementação do sistema foi muito importante, pois solucionou as dificuldades enfrentadas com a antiga forma de tratamento. Nos quatorze anos de funcionamento da SBN, não houve mais problemas.

Os wetlands superaram as expectativas da presidente, atendendo às necessidades de tratamento da instituição. Em seu relato, destacou a capacidade do sistema operar de forma estável e com baixa necessidade de manutenção, uma vantagem essencial para organizações com recursos limitados.

Quando questionada sobre qual acreditava ser a principal barreira para a adoção das SBN por outras empresas, foi comentado que poderia ser a falta de divulgação dessas soluções. Ela mencionou que nunca havia ouvido falar desse tipo de sistema antes e não conhece outro local que o utilize. Esse ponto reflete um dos principais desafios, também mencionados pelos especialistas entrevistados no estudo, ao serem perguntados sobre as barreiras de aceitação e implementação no Brasil.

5.2.2.4. Empresa 4

O colaborador da quarta empresa é um funcionário responsável pela operação e manutenção de equipamentos e do controle da parte elétrica das bombas, o qual relatou que o estabelecimento implantou um sistema de wetlands de fluxo vertical para o tratamento de efluentes. O empreendimento possui ligação à rede de coleta de esgoto, portanto, os wetlands tem como objetivo reduzir a carga orgânica e vazão de saída do efluente antes de ser enviada à rede de coleta da CASAN, especialmente durante a alta temporada, quando a loja chega a receber até 5 mil clientes. Apesar de ter gerado um custo adicional, comentou o colaborador, a empresa vê o sistema como uma prática alinhada com seus princípios de sustentabilidade, fortalecendo a imagem com um posicionamento ambientalmente responsável.

Apesar do sistema cumprir o objetivo de diminuir o pico de vazão, foi expressada certa insatisfação com o sistema. Ele relatou que talvez seria um sistema ultrapassado, através de um tratamento com base na natureza. Em sua opinião, um sistema tradicional poderia obter uma eficácia superior na diminuição da carga orgânica do efluente. Provavelmente, essa crítica espelha as experiências passadas com outras tecnologias e outras finalidades para o tratamento.

Em termos técnicos, os wetlands são uma solução interessante adotada pela empresa para reduzir picos de vazão (ROTÁRIA DO BRASIL, 2024) e remover parte da carga orgânica, sendo eficazes na remoção de sólidos em suspensão e em alguns poluentes orgânicos e inorgânicos também.

Figura 29 - Wetlands construídos



Fonte: Autor, 2024.

5.2.3. Usuário

O usuário entrevistado já teve um SBN em sua residência e relatou sua experiência com um sistema do tipo wetland de fluxo horizontal, projetado para complementar o tratamento de efluentes em sua residência, ficando após o filtro anaeróbico do conjunto da fossa séptica, no lugar do sumidouro.

O sistema, com dimensões de 5 metros por 4 metros, utilizava macrófitas como aguapé e taboa e, posteriormente, outras gramíneas começaram a surgir no local. Inicialmente, a eficiência do sistema foi avaliada como boa, alcançando cerca de 80% de remoção de nutrientes dissolvidos.

A escolha do wetland foi motivada pelo desejo de testar uma alternativa sustentável ao sumidouro convencional, posicionando-o como uma etapa terciária após o tanque séptico. No início, o sistema atendia às expectativas, sendo capaz de tratar o efluente de forma eficiente e sem gerar odores e parte da água tratada era reutilizada para irrigação do quintal.

No entanto, após 10 meses com o uso do sistema, o crescimento de árvores no terreno gerou um sombreamento que reduziu a capacidade de as macrófitas realizarem a fotossíntese, assim, os processos de absorção e remoção de nutrientes foram prejudicados. A partir disso, começou o surgimento de mau odor, então na segunda análise do efluente, o sistema foi abortado e o efluente gerado na residência foi ligado à rede de coleta de esgoto.

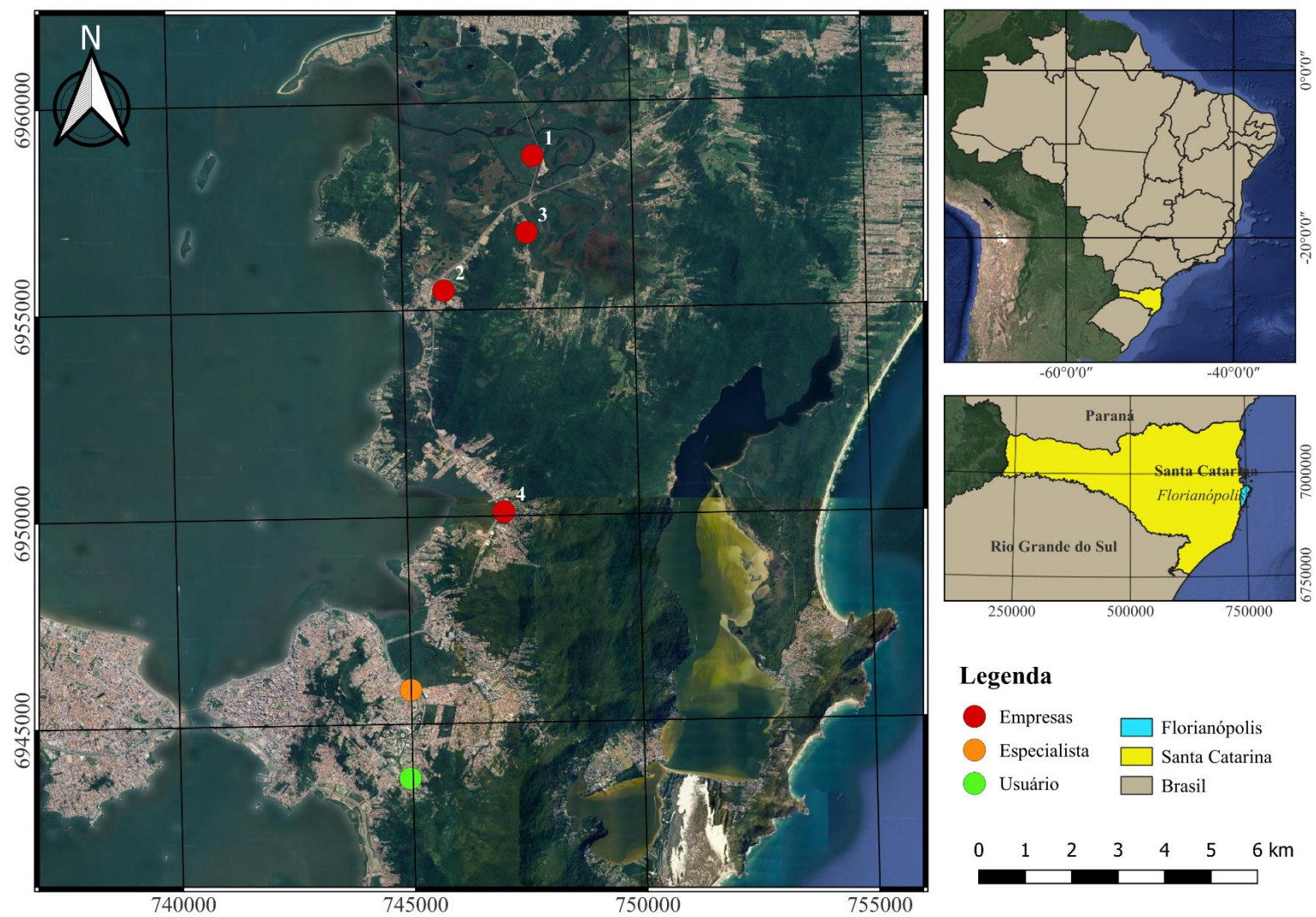
Apesar dos desafios enfrentados, Paulo recomendaria o uso das SBN, especialmente para pessoas que dispõem de condições adequadas de área, boa iluminação e uma topografia favorável.

5.3. SINTETIZAÇÃO DOS DADOS COLETADOS

5.3.1. Locais de estudo

Na Figura 31 é apresentado um mapa com os locais de estudo, sendo os pontos em vermelho a localização das empresas visitadas, com exceção da empresa 1, cujo questionário foi respondido online. O ponto laranja representa o local onde foi realizada uma entrevista presencial com a Vanessa, engenheira sanitária e ambiental especialista na área. Por fim, o ponto verde refere-se ao único usuário que o estudo conseguiu contato, o qual possuía uma SBN para tratamento de efluentes líquidos em sua casa, mas que já foi desativada. Vale destacar que a participação dos especialistas que responderam online não foi registrada no mapa.

Figura 30 - Mapa dos locais de estudo



Fonte: Autor, 2024.

Na região onde está localizada a empresa número 4, há uma rede coletora de esgoto. No entanto, foi instalado um sistema de wetlands com o objetivo de reduzir os picos de vazão e a concentração dos efluentes que serão encaminhados para a coleta. Já na área onde encontra-se a empresa 2, em Santo Antônio de Lisboa, a rede está implantada, mas não operando, enquanto que a empresa 3, em Ratones, e empresa 1, na entrada de Jurerê, não existe rede de coleta de esgoto, portanto, foram adotadas soluções sustentáveis para o tratamento de efluentes diretamente no lote.

5.3.2. Relevância dos dados

A coleta de opiniões a respeito das SBN ajuda a identificar pontos que merecem maior atenção para aumentar esta promoção às soluções baseadas na natureza e também pode servir como base para recomendações de políticas públicas e diretrizes para a ampliação do uso destas tecnologias, que realizam uma gestão sustentável de efluentes, especialmente nestes contextos de tratamento no lote, como o encontrado em alguns lugares de Florianópolis.

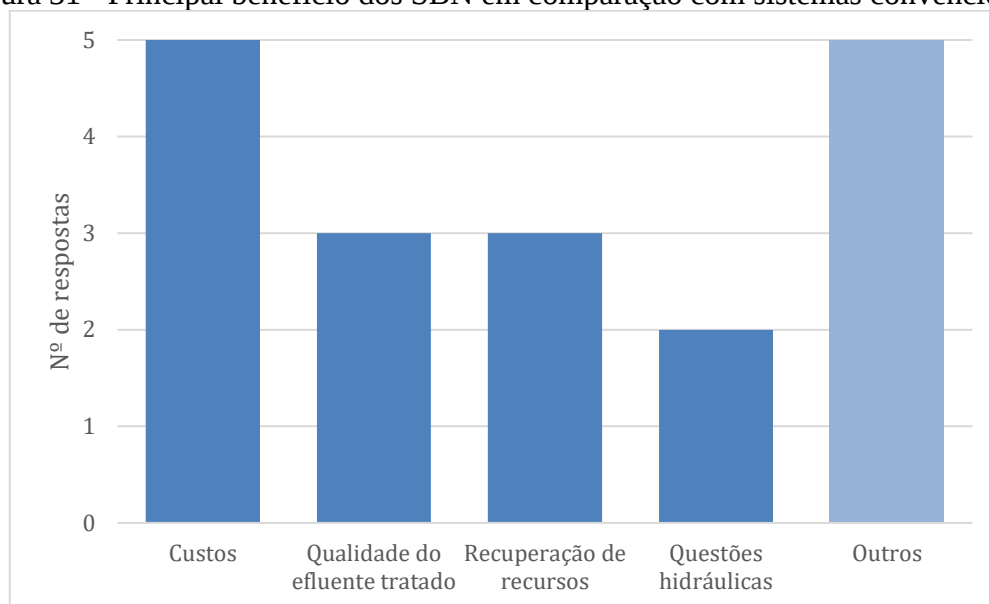
5.3.3. Sintetização das respostas

As figuras a seguir apresentam tabelas que visam sintetizar as respostas obtidas para cada grupo entrevistado.

5.3.3.1. Especialistas

Os sete especialistas que participaram do estudo citaram os wetlands construídos como a SBN mais eficiente e consolidada. Seus conhecimentos e experiências contribuíram para obter informações sobre os principais benefícios que eles veem dessas tecnologias, os desafios com a aceitação e implementação que podem surgir, alguns fatores que limitam a prática de reuso de efluente tratado por SBN e como as políticas públicas podem evoluir para incentivar a adoção dessas soluções. As sintetizações das respostas estão nas Figuras 32 a 35.

Figura 31 - Principal benefício dos SBN em comparação com sistemas convencionais



Fonte: Autor, 2024.

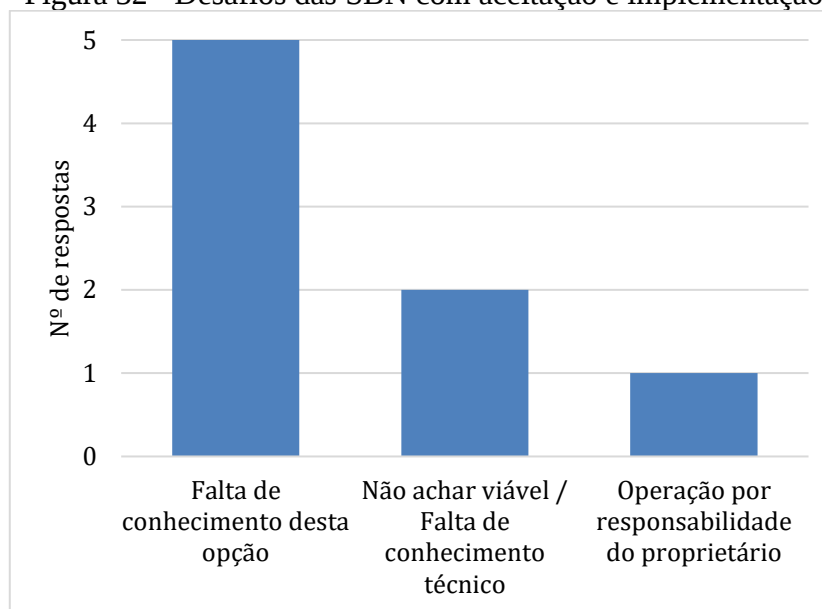
Quando comparado com os sistemas convencionais de tratamento de efluente, as SBN são vistas como alternativas que englobam diversas vantagens, como os custos, principalmente, como mostra a Figura 32, devido a economia na operação, manutenção e consumo de energia elétrica.

A qualidade do efluente tratado e a recuperação de recursos, seja por reuso do efluente tratado, ou do lodo, foram citadas três vezes. A eficiência dos wetlands, especificamente, reforça que são alternativas eficazes na remoção de poluentes e possuem alto valor sustentável, permitindo o reaproveitamento do lodo ou o reuso do efluente tratado. Algumas questões hidráulicas foram levantadas, sendo capacidade de absorver picos de vazão e carga orgânica, e a contribuição com a redução da pegada hídrica.

Houve outros benefícios citados, como a capacidade de apropriação da tecnologia pelos usuários, sua contribuição para a economia circular, fixação de CO₂, paisagismo e educação ambiental.

Os resultados mostram como as SBN vão além do tratamento de efluente, e passa a abranger uma série de benefícios ecológicos e sociais.

Figura 32 - Desafios das SBN com aceitação e implementação



Fonte: Autor, 2024.

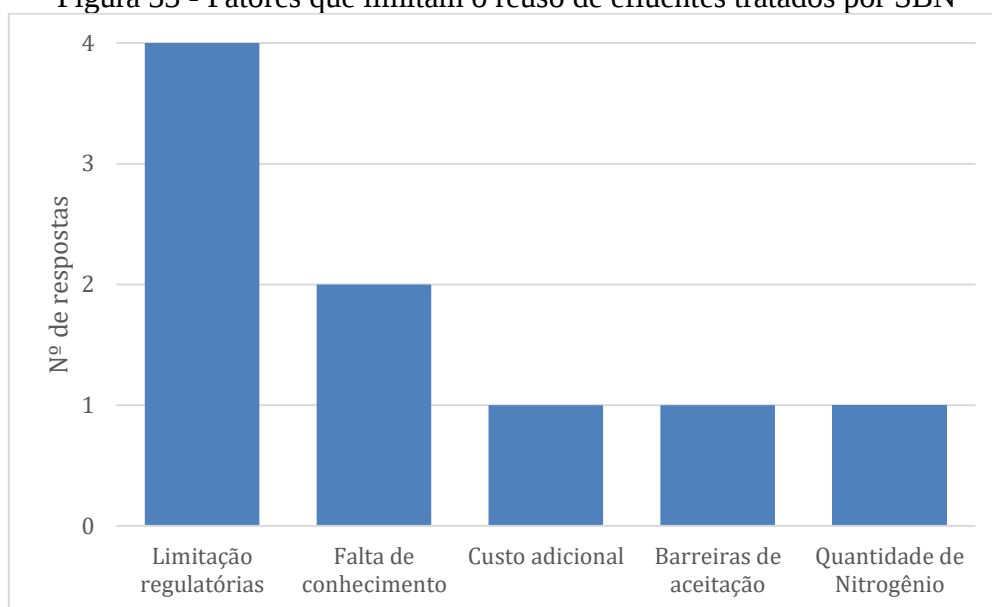
Referente aos desafios relacionados à aceitação e implementação dos SBN, a Figura 33 traz os destaques realizados pelos especialistas, sendo a falta de conhecimento sobre a existência e as possibilidades dos SBN como principal barreira. Estas respostas refletem a necessidade de maior divulgação e educação sobre esses sistemas, tanto entre os possíveis usuários, quanto com os projetistas.

Por falta de conhecimento técnico sobre o tema, as pessoas podem não achar viável este tipo de tratamento de efluentes, portanto, além da divulgação, deve-se mostrar como já está consolidado esta prática, suas vantagens e eficiência, para obter a confiança e aceitação da tecnologia.

Outro motivo que pode ser um desafio, seria a necessidade de o proprietário assumir a responsabilidade pela operação. Esse aspecto mostra como também é importante garantir que os sistemas sejam projetados para ser de fácil operação e manutenção, reduzindo as preocupações com esta responsabilidade.

Investir em estratégias de conscientização, educação técnica e simplificar a operação pode contribuir com a implantação desses sistemas. Não foram citadas preocupações referentes aos custos, o que reflete numa competitividade econômica dos SBN em relação a tecnologias convencionais.

Figura 33 - Fatores que limitam o reuso de efluentes tratados por SBN



Fonte: Autor, 2024.

A Figura 34 apresenta sobre os fatores limitantes mais comentados a respeito do reuso de efluentes tratados, sendo as limitações regulatórias a principal. Esse resultado expressa a necessidade de revisão e atualização das normas para reuso de efluente de maneira segura e eficiente, para que possibilite ainda mais o avanço dessas tecnologias.

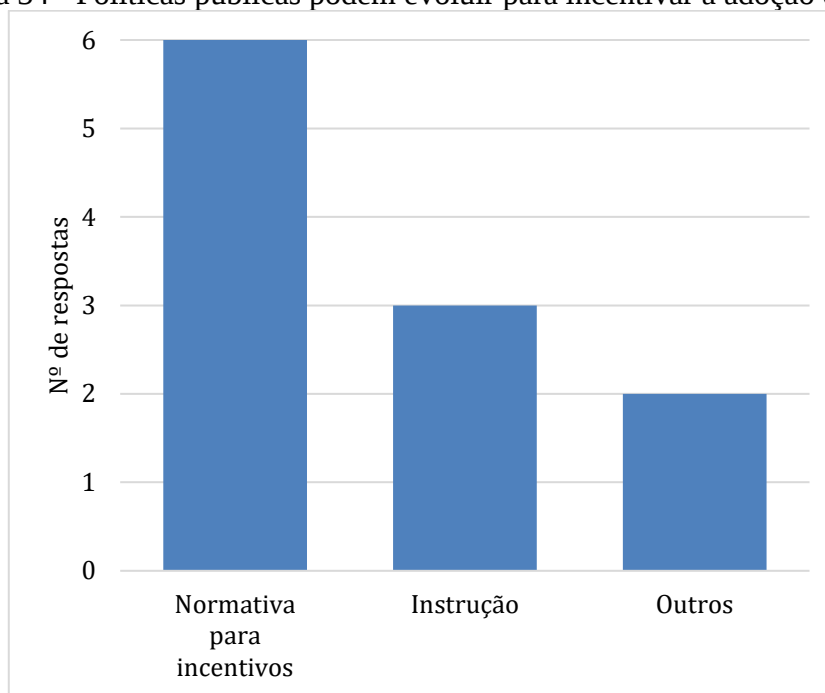
A falta de conhecimento, especialmente por parte da população, também foi destacada como um obstáculo. Isso sugere que educação e conscientização podem contribuir para aumentar a prática do reuso, mostrando os benefícios e a segurança do uso de efluentes tratados por SBN.

O custo adicional associado ao reuso, como a infraestrutura específica ou de etapas adicionais de tratamento, foi citado como uma limitação, o que pode ter relação com a presença de quantidades significativas de nitrogênio no efluente tratado também. Embora não sejam fatores predominantes, é uma questão a se considerar no projeto.

Questões relacionadas à aceitação social, como desinformação sobre o uso de efluentes tratados, foram identificadas como uma barreira, mas não seria algo tão urgente quando comparado às limitações regulatórias.

A qualidade geral do efluente tratado não foi apontada como um fator limitante, destacando a eficiência das SBN nesse aspecto e que são capazes de atender aos parâmetros seguros para reuso.

Figura 34 - Políticas públicas podem evoluir para incentivar a adoção de SBN



Fonte: Autor, 2024.

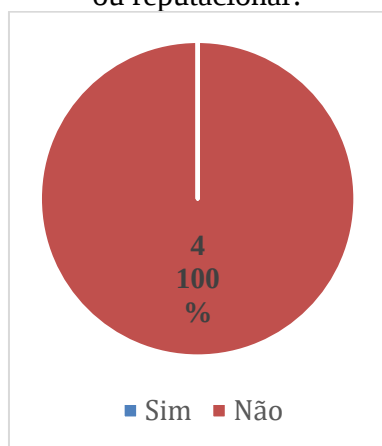
Quando perguntado como especificamente as políticas públicas poderiam evoluir para incentivar a adoção de SBN, grande parte das respostas seriam através da criação de incentivos, como incentivos fiscais, para viabilização do projeto, como mostra a Figura 35.

O fator de instrução está relacionado com os projetos de extensão universitária e a capacitação de profissionais e gestores. Por fim, foram citados outros aspectos, como implementação de sistemas de tratamento de esgoto com baixa emissão de carbono e a necessidade de tornar efetivo o Plano Municipal de Saneamento Básico, integrando as pesquisas e os técnicos envolvidos nas questões de saneamento.

5.3.3.2. Empresas

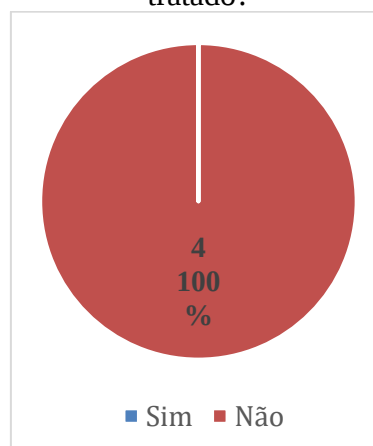
As empresas entrevistadas puderam responder se tiveram algum tipo de benefício econômico ou reputacional após implementação do sistema, se fazem o reuso de efluente tratado, se a solução atendeu as expectativas e caso tiveram algum desafio na implantação ou manutenção, oferecendo uma visão prática e corporativa sobre a utilização desses sistemas. Estas respostas podem ser visualizadas em formato de gráfico nas Figuras 36 a 39.

Figura 35 – Houve benefício econômico ou reputacional?



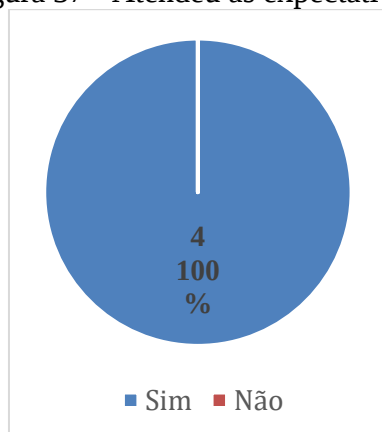
Fonte: Autor, 2024.

Figura 36 - Faz o reuso de efluente tratado?



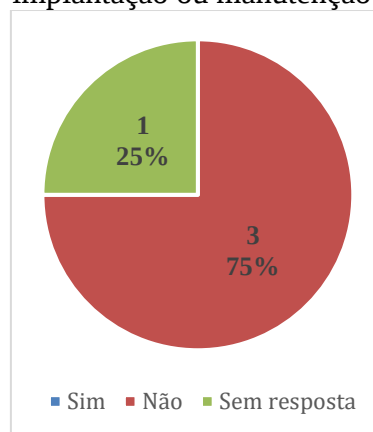
Fonte: Autor, 2024.

Figura 37 - Atendeu as expectativas?



Fonte: Autor, 2024.

Figura 38 – Tiveram desafios de implantação ou manutenção?



Fonte: Autor, 2024.

Nenhuma das empresas afirmou que obteve benefícios econômicos ou reputacionais (Figura 36) diretos com o uso de SBN. Embora estes sistemas possam ter vantagens operacionais ou ambientais, essas empresas não perceberam um impacto nas suas finanças ou imagem pública de uma forma mensurável. Essa percepção pode estar relacionada à falta de quantificar tais benefícios ou à falta de estratégias de comunicação que evidenciem os impactos positivos desses sistemas.

Novamente, nenhuma das empresas realiza o reuso de efluentes tratados pelos wetlands por ausência de infraestrutura para aproveitar o efluente tratado de maneira a torná-lo reutilizável.

Todas as empresas afirmaram que as SBN atenderam às suas expectativas, indicando que a implementação dos sistemas foi bem-sucedida. Embora os benefícios econômicos não tenham sido observados, as expectativas relacionadas ao desempenho e eficiência do tratamento foram atendidas.

Três empresas afirmaram não ter enfrentado desafios significativos durante a implantação ou manutenção dos sistemas, enquanto uma não pôde responder, pois o entrevistado não estava presente na época da implantação. Assim, em sua maioria, as empresas consideraram o processo de implementação e operação dos sistemas relativamente simples, sem problemas ao longo dos anos de utilização.

5.3.3.3. *Usuário*

O único usuário que o estudo conseguiu contato compartilhou sua experiência com a instalação e operação de um sistema SBN em sua casa. Apesar de representar uma vivência individual, seu relato ajudou compartilhando percepção e os desafios enfrentados por este usuário doméstico.

O sistema utilizado foi um wetland de fluxo horizontal, o qual esteve em operação por menos de um ano. Durante esse período, o usuário enfrentou problemas operacionais, mas avaliou a eficiência do sistema na remoção de odores como bastante eficaz. A água tratada foi utilizada para fins específicos, demonstrando que o sistema atendeu parcialmente às necessidades do usuário.

Apesar de ter enfrentado alguns desafios operacionais, o usuário recomendaria o uso dos SBN para outras pessoas, sendo assim, uma avaliação positiva do sistema no geral.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu analisar e avaliar a viabilidade e o impacto das Soluções Baseadas na Natureza para o tratamento descentralizado de efluentes líquidos em Florianópolis, a partir das percepções de especialistas, empresas e usuário. A metodologia envolveu uma pesquisa sobre a eficiência de remoção de poluentes, os co-benefícios ambientais, entrevistas com diversos grupos para coletar informações e experiências com estes sistemas. Foi possível concluir que os SBN representam uma alternativa sustentável e eficaz para atender às demandas no próprio lote.

O marco regulatório representado pela Lei nº 14.904/2024 e pela atualização da ABNT NBR 17076:2024 também foi um avanço importante. Essa normativa da ABNT apresentou critérios técnicos para a implementação de sistemas descentralizados, promovendo segurança, eficiência e sustentabilidade. A inclusão oficial das SBN na legislação como estratégia de adaptação às mudanças climáticas reforça sua capacidade de mitigar problemas ambientais.

Os métodos adotados neste estudo, como revisão bibliográfica, com o conhecimento técnico, análise de estudos de caso e coleta de depoimentos, com as percepções e experiências individuais, permitiram construir uma visão abrangente e fundamentada sobre o tema, complementando os dados quantitativos e qualitativos.

Os resultados destacaram a eficiência dos wetlands construídos em diferentes configurações, como os sistemas de fluxo vertical, vertical francês, horizontal, entre outros, na remoção de poluentes, incluindo DBO, DQO, nitrogênio, fósforo e SST. Além disso, os SBN demonstraram oferecer diversos co-benefícios, como a promoção da biodiversidade, o sequestro de carbono, a regulação da temperatura, a melhoria estética dos ambientes onde estão inseridos etc. A pesquisa também revelou que a falta de conhecimento desta possibilidade entre usuários é a principal barreira para sua adoção em larga escala.

No contexto local de Florianópolis, constatou-se que os SBN são adequados tanto para áreas com restrições ambientais, como as de APPs, como utiliza a empresa 1, quanto para regiões sem acesso a redes centralizadas de esgoto, como as empresas 2 e 3. Estes sistemas também se mostram viáveis para locais que possuam a rede coletora, mas que desejam adotar uma prática sustentável, como a empresa 4 e usuários residenciais, como o caso apresentado que implementou a tecnologia em sua casa.

Os depoimentos contribuíram para diferentes visões sobre as SBN. Especialistas ressaltaram que, além dos benefícios ambientais, os SBN oferecem soluções economicamente viáveis, especialmente quando operados por gravidade, reduzindo custos de operação.

Entretanto, foi ressaltado a importância de políticas públicas e incentivos fiscais para impulsionar a adoção dessas tecnologias. As empresas apontaram que os custos de implementação e manutenção foram ligeiramente mais baratos em relação aos sistemas convencionais, e ainda possui uma alta durabilidade dos sistemas. Já o usuário destacou os benefícios ambientais, como a reutilização da água tratada para rega do jardim, e as dificuldades enfrentadas pelo sombreamento. Esses relatos evidenciam que as SBN têm grande potencial de integração em comunidades locais, especialmente em regiões com infraestrutura sanitária limitada.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o aprofundamento na análise econômica detalhada das diferentes tecnologias de SBN, considerando custos de implantação, operação e benefícios a longo prazo. Também seria relevante explorar mais residências e empresas que façam o uso dessas tecnologias.

Este trabalho deixa contribuições tanto para a comunidade acadêmica quanto para os gestores públicos e privados. Ele oferece uma base teórica e prática para a implementação de SBN em Florianópolis para a promoção de um saneamento mais sustentável e acessível.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229**: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17076**: Projeto de sistema de tratamento de esgoto de menor porte - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

BORTOLI, M.; KUNZ, A.; SOARES, H. M.; BELL FILHO, P.; DA COSTA, R. H. R. **Emissão de óxido nitroso nos processos de remoção biológica de nitrogênio de efluentes**. v. 17, n. 1, p. 1-6, 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/HtrgdCdPdT9b6hxSmhYZfkx/>>. Acesso em: 6 out. 2024.

BRASIL. **Lei nº 14.904, de 27 de junho de 2024**. Estabelece diretrizes para a elaboração de planos de adaptação à mudança do clima; altera a Lei nº 12.114, de 9 de dezembro de 2009; e dá outras providências. Diário Oficial da União, 28 jun. 2024. Disponível em: <https://planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14904.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2014.904%2C%20DE%2027,Art>. Acesso em: 11 out. 2024.

BRIX, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands?. **Water Science and Technology**, v. 35, n. 5, p. 11-15, 17 nov. 1997. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/230563377_Do_Macrophytes_Play_a_Role_in_Constructed_Treatment_Wetlands>. Acesso em: 25 out. 2024.

CAGECE. **Cagece planeja tratar esgoto com Soluções Baseadas na Natureza**. 13 out. 2021. Disponível em: <<https://www.cagece.com.br/comunicacao/noticias/cagece-planeja-tratar-esgoto-com-solucoes-baseadas-na-natureza/>>. Acesso em: 6 out. 2024.

COHEN-SHACHAM, E.; JANZEN, C.; MAGINNIS, S.; WALTERS, G. **Nature-based Solutions to address global societal challenges**. 2016. 97 p. ISBN 978-2-8317-1812-5. DOI <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>. Disponível em: <<https://portals.iucn.org/library/node/46191>>. Acesso em: 12 out. 2024.

CROSS, K.; TONDERA, K.; RIZZO, A.; ANDREWS, L.; PUCHER, B.; KARRES, N., MCDONALD, R. **Nature-Based Solutions for Wastewater Treatment: A SERIES OF FACTSHEETS AND CASE STUDIES**. 1. ed. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2021. 337 p. ISBN 9781789062267. Disponível em: <<http://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/929917/wio9781789062267.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2024.

DOTRO, G.; GÜNTHER, L.; MOLLE, P.; NIVALA, J.; PUIGAGUT, J.; STEIN, O.; VON SPERLING, M. **TREATMENT WETLANDS**. IWA Publishing, 2017. v. 7. Disponível em: <<http://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/1843/wio9781780408774.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2024.

GEARHEART, R. FREE WATER SURFACE TREATMENT WETLANDS. *In: NATURE-BASED Solutions for Wastewater Treatment: A SERIES OF FACTSHEETS AND CASE STUDIES*. 1. ed. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2021. p. 203-226. ISBN 9781789062267. Disponível em: <<http://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/929917/wio9781789062267.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2024.

GONÇALVES, V. Nova lei estabelece regras gerais para adaptação às mudanças climáticas. **Agência Senado**, 28 jun. 2024. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2024/06/28/nova-lei-estabelece-regras-gerais-para-adaptacao-as-mudancas-climaticas>>. Acesso em: 6 out. 2024.

KADLEC, R. H. Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands. **Ecological Engineering**, v. 35, p. 159-174, 9 fev. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857408000840>>. Acesso em: 22 nov. 2024.

KADLEC, R.; WALLACE, S. D. **TREATMENT WETLANDS**. 2. ed. Florida, EUA: CRC Press, 2009. 348 p. ISBN 13: 978-1-56670-526-4.

KERNE, S. D. NBR 17076 – FOSSA, FILTRO E SUMIDOURO. **PROJETISTA PLENO**, 2024. Disponível em: <<https://projetistapleno.com/nbr-17076/>>. Acesso em: 29 out. 2024.

LAUTENSCHLAGER, S. R. **Modelagem do desempenho de wetlands construídas**. São Paulo, SP, 2001. 90 p. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-11072002-091741/publico/dissertacao.srl.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2024.

LANGERGRABER, G. VERTICAL-FLOW TREATMENT WETLANDS. *In: NATURE-BASED Solutions for Wastewater Treatment: A SERIES OF FACTSHEETS AND CASE STUDIES*. 1. ed. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2021. p. 95-120. ISBN 9781789062267. Disponível em: <<http://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/929917/wio9781789062267.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2024.

MANES, S.; VALE, M. M.; MALECHA, A.; PIRES, A. P. F. Nature-based solutions promote climate change adaptation safeguarding ecosystem services. **Ecosystem Services**, v. 55, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212041622000353?via%3Dihub>>. Acesso em: 1 out. 2024.

MONTEIRO, L. N. **SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM TEMPO REAL**. Orientador: Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão. 2020. 103 p. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Sorocaba, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/63b74b19-cac9-436c-ba89-d70af76be5f4/content>>. Acesso em: 23 nov. 2024.

NIELSEN, S. SLUDGE TREATMENT REED BEDS. *In: NATURE-BASED Solutions for Wastewater Treatment: A SERIES OF FACTSHEETS AND CASE STUDIES*. 1. ed. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2021. p. 270-289. ISBN 9781789062267. Disponível

em: <<http://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/929917/wio9781789062267.pdf>> Acesso em: 6 out. 2024.

NOVA norma da ABNT - NBR 17076:2024 - Projeto de sistema de tratamento de esgoto de menor porte. **água & efluentes**, [S. l.], p. 1, 10 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.aguaeeffluentes.com.br/post/nova-norma-da-abnt-nbr-17076-2024-projeto-de-sistema-de-tratamento-de-esgoto-de-menor-porte>>. Acesso em: 11 nov. 2024.

ONU. Mais de 4,2 bilhões de pessoas vivem sem acesso a saneamento básico. **Nações Unidas Brasil**. 19 nov. 2020. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/101526-mais-de-42-bilh%C3%B5es-de-pessoas-vivem-sem-acesso-saneamento-b%C3%A1sico>>. Acesso em: 6 out. 2024.

ONU News. 46% da população global vive sem acesso a saneamento básico. **ONU News**, 22 mar. 2023. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2023/03/1811712>>. Acesso em: 6 out. 2024.

PEREIRA, A. M.S.; LIMA, B. S.; SENA, I. M. N. Periódicos UniFTC. **UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS WETLANDS NO TRATAMENTO DE ESGOTO RESIDENCIAL**, v. 1, n. 1, 2022.

PERONDI, T.; WOLFF, D. B.; DECEZARO, S. T.; ARAÚJO, R. K. Wetlands construídos para o tratamento de esgoto doméstico: uma análise comparativa do custo do ciclo de vida. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 175-189, jun. 2024. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000200394>. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ac/a/HGrCnXyRwQZN3QGsbkskR8Tv/>>. Acesso em: 25 out. 2024.

RIZZO, A. AERATED TREATMENT WETLANDS. In: **NATURE-BASED Solutions for Wastewater Treatment: A SERIES OF FACTSHEETS AND CASE STUDIES**. 1. ed. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2021. p. 176-190. ISBN 9781789062267. Disponível em: <<http://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/929917/wio9781789062267.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2024.

RIZZO, A.; TONDERA, K. HORIZONTAL-FLOW TREATMENT WETLANDS. In: **NATURE-BASED Solutions for Wastewater Treatment: A SERIES OF FACTSHEETS AND CASE STUDIES**. 1. ed. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2021. p. 159-175. ISBN 9781789062267. Disponível em: <<http://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/929917/wio9781789062267.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2024.

ROTÁRIA DO BRASIL. Regras básicas a se considerar para o dimensionamento de wetland. In: **Wetlands: uma solução ecológica de tratamento de efluentes**. 24 ago. 2024. Disponível em: <<https://brasil.rotaria.net/wetlands-uma-solucao-ecologica-de-tratamento-de-efluentes/>>. Acesso em: 24 nov. 2024.

SALATI, E.; SALATI FILHO, E.; SALATI, E. **Utilização de sistema de wetlands construídas para tratamento de águas**. 2009. 23 p. Piracicaba, 2009. Disponível em: <<http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/pactodasaguas/2011/12/sistema-wetlands.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2021

SANTOS, M. F. N. Projeto e avaliação de custos de um sistema compacto de wetlands construídos para habitação social no município de Bauru-SP. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 7, n. 52, 2019.

SCHROEDER, A. K. **Avaliação de tecnologias normatizadas e wetlands construídos empregados no tratamento descentralizado de esgoto por meio de análise multicriterial**. Orientador: P. H. Sezerino. 2020. 139 p. Tese (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Aluna, Florianópolis, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216638>>. Acesso em: 10 dez. 2024.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE, INFRAESTRUTURA E LOGÍSTICA DO ESTADO DE SP (SEMIL). **Soluções Baseadas na Natureza (SbN)**. 05 mai. 2023. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/solucoes_baseadas_na_natureza/>. Acesso em: 6 out. 2024.

SELEGUIM, F. B. Soluções Baseadas na Natureza ajudam cidades brasileiras a se adaptarem aos impactos das mudanças climáticas. **SciELO em perspectiva humanas**, 7 maio 2024. Disponível em: <<https://humanas.blog.scielo.org/blog/2024/05/07/solucoes-baseadas-na-natureza-e-mudancas-climaticas/>>. Acesso em: 7 out. 2024.

SEZERINO, P. H.; BENTO, A. P.; DECEZARO, Samara T.; MAGRI, Maria E.; PHILIPPI, Luiz S. **Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias**: parâmetros de projeto para sistemas horizontais, v. 20, n. 1, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/8zwy5WwwLZVxRk5btDHDMkG/>>. Acesso em: 8 out. 2024.

SEZERINO, P. H.; ROUSSO, B. Z.; DOS SANTOS, M. O.; FREITAS, Monique N.; FECHINE, Victor Y.; LOPES, Ana Maria B. **WETLANDS CONSTRUÍDOS APLICADOS NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**: Recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção. 1. ed. Tubarão, SC: Copiart, 2018. 53 p. ISBN 978-85-8388-127-8. Disponível em: <<http://gesad.ufsc.br/boletins/>>. Acesso em: 08 nov. 2024.

SEZERINO, P. H.; PELISSARI, C. **WETLANDS CONSTRUÍDOS COMO ECOTECNOLOGIA PARA O TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS: EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS**. 1. ed. Curitiba, PR: Brazil Publishing, 2021. 175 p. ISBN 978-65-5861-293-3. Disponível em: <<http://gesad.ufsc.br/boletins/>>. Acesso em: 08 nov. 2024.

SILVA, J. R. R.; RIBEIRO, A. C.; SANTOS, L. F. O.; BERSANETTE, G. D.; CONTE, H. Wetlands construídas para tratamento de efluentes industriais: revisão. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 13, n. 4, p. 232-248, 2022. Disponível em: <<https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/download/7156/3954/16042>>. Acesso em: 23 out. 2024.

SILVA, L. D. **MONITORAMENTO DE QUALIDADE DE ÁGUA ATRAVÉS DE SENSORES ROBÓTICOS ARDUINO**. Orientador: Profa. Dra. Christiane Marie Schweitzer. 2022. 137 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenheiro Eletricista) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp, Ilha Solteira, 2022.

SILVA, J. D. S. S.; LOPES, R. L.; TORRES, D. M.; SILVA, R. D. R. Uso do lodo de ETE na produção de tijolos cerâmicos: Uma revisão sistemática de literatura. **Society and Development**, v. 10, n. 8, 2021. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/17200/15460>>. Acesso em: 4 nov. 2024.

SOUZA, J. T.; VAN HAANDEL, A.; LIMA, E. P. C.; HENRIQUE, I. N. **UTILIZAÇÃO DE WETLAND CONSTRUÍDO NO PÓS-TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS PRÉ-TRATADOS EM REATOR UASB**. v. 9, n. 4, p. 285-290, 2004. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/GQ6Mfkn7htmGfqrQXgsFcJN/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 23 nov. 2024.

STEFANAKIS, A. I., AKRATOS, C. S., TSIHRINTZIS, V. A. Vertical Flow Constructed Wetlands: Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment. **Elsevier Publishing**, Amsterdam, Países Baixos, 2014.

TONDERA, K.; RIZZO, A.; MOLLE, P.. FRENCH VERTICAL-FLOW TREATMENT WETLANDS. In: **NATURE-BASED Solutions for Wastewater Treatment: A SERIES OF FACTSHEETS AND CASE STUDIES**. 1. ed. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2021. p. 121-143. ISBN 9781789062267. Disponível em: <<http://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/929917/wio9781789062267.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2024.

TONETTI, A. L.; BRASIL, A. L.; MADRID, F. J. P. L.; FIGUEIREDO, Isabel C. S.; SCHNEIDER, Jerusa; CRUZ, Luana M. O.; DUARTE, Natália C.; FERNANDES, Patrícia M.; COASACA, Raúl L.; GARCIA, Rodrigo S.; MAGALHÃES, Taína M. **TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS EM COMUNIDADES ISOLADAS**: referencial para a escolha de soluções. 1. ed. Campinas: Biblioteca Unicamp, 2018. 153 p. ISBN 978-85-85783-94-5.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S. EPA). **Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters**. Ohio, Set. 2000a. 165 p. Disponível em: <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/free_water_surface_wetlands.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S. EPA). **Wastewater Technology Fact Sheet: Free Water Surface Wetlands**. Washington, Set. 2000b. 165 p.

VARMA, M.; GUPTA, A. K.; GHOSAL, P. S.; MAJUMDER, A.. A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. **Science of the Total Environment**, v. 755, 10 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720360691>>. Acesso em: 8 nov. 2024.

VIGILÂNCIA SANITÁRIA DE FLORIANÓPOLIS. **Está em vigor a norma técnica ABNT NBR 17076/2024**. Florianópolis, 6 jun. 2024. Instagram: visaf Florianópolis. Disponível em: <<https://www.instagram.com/visaf Florianópolis/p/C737S9ng5qK/>>. Acesso em: 29 out. 2024

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P. H. (2018). Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. **Boletim Wetlands Brasil**, Edição Especial, dezembro/2018. 65 p. ISSN 2359-0548. Disponível em: <<http://gesad.ufsc.br/boletins/>>. Acesso em: 08 nov. 2024.

WETLANDS BLOG. **Conheça as eficiências de desempenho dos wetlands através de 3 relevantes publicações científicas**. 10 mai. 2023a. Disponível em: <<https://www.wetlands.com.br/post/conhe%C3%A7a-as-efici%C3%Aancias-de-desempenho-dos-wetlands-atrav%C3%A9s-de-3-relevantes-publica%C3%A7%C3%B5es-cient%C3%ADficas>>. Acesso em: 8 out. 2024.

WETLANDS BLOG. **Vertical, horizontal, superficial: saiba quais são os principais tipos de sistemas wetlands existentes**. 22 dez. 2023b. Disponível em: <<https://www.wetlands.com.br/post/saiba-quais-s%C3%A3o-os-tipos-de-sistemas-wetlands-existent#:~:text=Os%20wetlands%20s%C3%A3o%20sistemas%20que,efluentes%20para%20reuso%20e%20muito>>. Acesso em: 6 out. 2024.

ZHANG, D. Q.; JINADASA, K.B.S.N.; GERSBERG, Richard M.; LIU, Yu; NG, Wun J.; TAN, Soon K. Application of constructed wetlands for wastewater treatment in developing countries: A review of recent developments (2000 - 2013). **Journal of Environmental Management**, v. 141, p. 116-131, 1 ago. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714001509>>. Acesso em: 8 nov. 2024.

ANEXO A – QUESTIONÁRIOS

Questionário para Usuários

Nome:

Qual é o tipo de sistema baseado na natureza utilizado na sua residência/propriedade para o tratamento de esgoto?

Resposta: _____

Há quanto tempo você utiliza este sistema?

☐ Menos de 1 ano

☐ 1-5 anos

☐ Mais de 5 anos

Qual foi o motivo principal para a escolha de um sistema baseado na natureza?

Resposta: _____

Você já teve algum problema operacional com o sistema? Se sim, qual foi o problema e como foi resolvido?

Resposta: _____

Como você avalia a eficiência do sistema na remoção de odores?

☐ Muito eficiente

☐ Eficiente

☐ Pouco eficiente

☐ Ineficiente

Você utiliza a água tratada para algum fim específico (irrigação, lavagem de áreas externas, etc.)?

☐ Sim

☐ Não

Se sim, para qual finalidade? _____

Na sua opinião, quais são as maiores vantagens desse tipo de sistema em relação aos convencionais?

Resposta: _____

Quais são os principais desafios ou dificuldades que você enfrentou ao usar o sistema?

Resposta: _____

Você recomendaria o uso de SBN para vizinhos ou outras pessoas? Por quê?

Resposta: _____

Há alguma sugestão que você daria para melhorar o sistema que você usa?

Resposta: _____

Você autoriza o uso das suas respostas para fins acadêmicos e de pesquisa?

☐ Sim

☐ Não

Questionário para Empresas

Nome:

Empresa:

Qual é o setor de atuação da empresa?

☐ Hoteleiro

☐ Agricultura

☐ Indústria

☐ Outro (especificar): _____

Qual tipo de Sistema Baseado na Natureza é utilizado na empresa para tratamento de efluentes?

Resposta: _____

Por que a empresa optou por adotar uma solução baseada?

Resposta: _____

Como você avalia o custo de implementação e manutenção do Sistema Baseado na Natureza em comparação com sistemas convencionais?

☐ Muito mais barato

☐ Moderadamente mais barato

☐ Custo semelhante

☐ Mais caro

A empresa obteve algum benefício econômico ou reputacional após a instalação do sistema?

☐ Sim

☐ Não

Se sim, quais foram os principais benefícios? _____

A empresa utiliza a água tratada para algum reuso?

☐ Sim

☐ Não

Se sim, qual é a finalidade do reuso? _____

O sistema atendeu às expectativas de eficiência no tratamento de efluentes?

☐ Sim

☐ Não

Se não, quais foram as falhas ou deficiências observadas? _____

A empresa teve algum desafio ou dificuldade na implantação ou manutenção do sistema?

☐ Sim

☐ Não

Se sim, quais? _____

Qual a opinião dos colaboradores e clientes da empresa sobre a adoção de um Sistema Baseado na Natureza?

Resposta: _____

Na sua visão, quais seriam as principais melhorias necessárias para incentivar mais empresas a adotarem o Sistema Baseado na Natureza?

Resposta: _____

Você autoriza o uso das suas respostas para fins acadêmicos e de pesquisa?

☐ Sim

☐ Não

Questionário para Especialistas

Nome:

Qual é o seu campo de especialização?

Resposta: _____

Com base em sua experiência, qual tecnologia de SBN você considera mais eficiente e consolidada para o tratamento de efluentes domésticos descentralizados?

Resposta: _____

Qual a sua avaliação sobre o principal benefício dos SBN em comparação com sistemas convencionais?

Resposta: _____

Quais os principais desafios que os SBN enfrentam em termos de aceitação e implementação no Brasil?

- ☐ Falta de conhecimento desta opção
- ☐ Não achar viável / Falta de conhecimento técnico
- ☐ Custo de implementação
- ☐ Outro (especificar): _____

Quais são os principais fatores que limitam o reuso de efluentes tratados por SBN no Brasil?

- ☐ Limitação regulatórias
- ☐ Custo adicional
- ☐ Barreiras de aceitação
- ☐ Qualidade do efluente
- ☐ Outro (especificar): _____

Na sua opinião, como as políticas públicas brasileiras podem evoluir para incentivar a adoção de SBN?

Resposta: _____

Quais inovações tecnológicas você acredita que podem impulsionar o uso das SBN?

Resposta: _____

Há algum exemplo ou estudo de caso específico que você considera referência no uso de SBN para tratamento de efluentes descentralizados?

Resposta: _____

Você gostaria de adicionar mais algum comentário ou sugestão sobre SBN?

Resposta: _____

Você autoriza o uso das suas respostas para fins acadêmicos e de pesquisa?

☐ Sim

☐ Não