

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE
CAMPUS DE TOLEDO
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ECONOMIA
NÍVEL DE MESTRADO

ELISA PEREIRA MEDEIROS

***WETLANDS* CONSTRUÍDOS: ECONOMIA, ECOLOGIA E SUSTENTABILIDADE**

TOLEDO

2023

ELISA PEREIRA MEDEIROS

***WETLANDS* CONSTRUÍDOS: ECONOMIA, ECOLOGIA E SUSTENTABILIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Economia, do Centro de Ciências Sociais Aplicadas, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – *Campus* Toledo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Economia.

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Mendes Bezerra.

TOLEDO

2023

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Pereira Medeiros, Elisa
Wetlands Construídos: Economia, Ecologia e
Sustentabilidade / Elisa Pereira Medeiros; orientadora
Fernanda Mendes Bezerra. -- Toledo, 2023.
102 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Toledo) --
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências
Sociais Aplicadas, Programa de Pós-Graduação em Economia, 2023.

1. Wetlands Construídos. 2. Desenvolvimento Econômico
Sustentável. 3. Economia Ambiental. 4. Economia Ecológica. I.
Mendes Bezerra, Fernanda, orient. II. Título.

ELISA PEREIRA MEDEIROS

WETLANDS CONSTRUÍDOS: ECONOMIA, ECOLOGIA E SUSTENTABILIDADE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Economia, do Centro de Ciências Sociais Aplicadas, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – *Campus* Toledo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Economia.

COMISSÃO EXAMINADORA

Profa. Dra. Fernanda Mendes Bezerra
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Prof. Dr. Cristiano Stamm
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Prof. Dr. Guilherme de Oliveira
Universidade Federal de Santa Catarina

Toledo, ____ de _____ de 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais por todo o apoio sempre. À Tatiani, por todo o suporte no dia a dia. Aos amigos do mestrado que, mesmo longe, dividiram a caminhada comigo. Aos amigos de sempre, por toda a torcida e motivação. À orientadora Fernanda, por me acompanhar no caminho com precisão e leveza. Aos professores e coordenadores do curso, por acreditarem no nosso potencial e fortalecerem os nossos conhecimentos. Ao professor Pablo Heleno Sezerino, pela indicação de literatura, e ao professor Eduardo Bello Rodrigues, pelo apoio à pesquisa. À amiga Jéssica, pelo suporte e inspiração acadêmica. E à madrinha Giseli, por iluminar o caminho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“O mundo tem a maior necessidade de uma nova ética. Se os nossos valores forem justos, todo o resto – preço, produção, distribuição e até poluição – deve ser justo.”

(Georgescu-Roegen, 2012, p. 156)

RESUMO

MEDEIROS, Elisa Pereira. *Wetlands Construídos*: economia, ecologia e sustentabilidade. 2023. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Economia, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2023.

Este trabalho tem por objetivo inferir como a tecnologia do sistema *Wetlands Construídos* pode contribuir para o alcance da universalização do acesso ao esgotamento sanitário no Brasil. Os WC são uma alternativa de tratamento de águas residuais que simula um ecossistema do tipo pântano ao utilizar de processos biológicos, com o uso de plantas e micro-organismos. Logo, foi realizada a investigação, na literatura, da dinâmica dos sistemas WC e sua relação com os pressupostos norteadores da Economia Ambiental e da Economia Ecológica. Dentre os resultados encontrados, está o fato de que nem sempre o sistema é a alternativa menos custosa, sobretudo em consideração a gastos com terraplanagem. A tecnologia se relaciona com os pressupostos da Economia Ambiental em suas duas vertentes, Economia dos Recursos Naturais e Economia da Poluição. Contudo, as características econômicas e sociais do setor de saneamento não coincidem com os fundamentos que embasam a teoria neoclássica. Já para a Economia Ecológica, a solução se equipara aos fundamentos da teoria, mesmo assim requer o monitoramento do processo de tratamento e do ecossistema. Conclui-se que para alcançar as metas de universalização de esgotamento sanitário é necessário ampliar políticas públicas de incentivo no uso de *Wetlands Construídos* e de outros sistemas descentralizados no Brasil, principalmente em regiões rurais e isoladas dos centros urbanos.

Palavras-chave: *Wetlands Construídos*. Desenvolvimento Econômico Sustentável. Economia Ambiental. Economia Ecológica.

ABSTRACT

MEDEIROS, Elisa Pereira. **Constructed Wetlands**: economy, ecology and sustainability. Dissertation (Master's in Economics) – Centre for Applied Social Sciences, Western Paraná State University, Toledo, 2023.

This study aims to infer how the Constructed Wetlands (CW) system can contribute to achieve universal access to sanitary sewage in Brazil. CW are a wastewater treatment alternative that simulates a swamp-like ecosystem by using biological processes, with plants and microorganisms. Therefore, an investigation will be conducted in the literature about the dynamics of CW systems and their relationship with the guiding assumptions of Neoclassical Environmental Economics and Ecological Economics. Among the results discussed is the fact that the system is not always the less expensive alternative, especially in consideration of expenses with earthmoving works. Technology is related to the assumptions of Environmental Economics in its two strands, Natural Resources Economics and Economics of Pollution. However, the economic and social characteristics of the sanitation sector do not coincide with the fundamentals that support the neoclassical theory. As for Ecological Economics, the solution equates with the fundamentals of theory, even though it requires monitoring the treatment process and the ecosystem. The conclusion is that in order to achieve the goals of sanitation sewage universalization, it is necessary to expand public policies to encourage the use of Constructed Wetlands and other decentralized systems in Brazil, mainly in rural areas and isolated regions from urban centers.

Keywords: Constructed Wetlands. Sustainable Economic Development. Environmental Economics. Ecological Economics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Percentual de domicílios atendidos com esgotamento sanitário, por forma de afastamento, no País e nas macrorregiões, em 2010 e 2017.....	40
Figura 2: Percentual de domicílios atendidos com esgotamento sanitário, por forma de afastamento, nas áreas urbana e rural do País, em 2010 e 2017.....	41
Figura 3: Índice de tratamento dos esgotos gerados no País e nas macrorregiões, em 2010 e 2017.....	42
Figura 4: Prestadores por natureza jurídica	50
Figura 5: Classificação dos <i>wetlands</i> construídos.....	54
Figura 6: <i>Wetland</i> Construído de fluxo vertical com fundo saturado (WCV-FS).....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva de Kuznets Ambiental	24
Gráfico 2: Curva de Poluição Ótima	26
Gráfico 3: Saneamento e Desenvolvimento Humano, 2019.....	44
Gráfico 4: Participação do turismo no emprego e saneamento básico, 2019	46
Gráfico 5: Valores de CAPEX + OPEX para as tecnologias estudadas e empregadas no tratamento de esgoto de um equivalente populacional de 150 pessoas, sob horizonte de projeto de 15 anos*	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Diferenças de enfoque entre a Economia Ecológica e a Economia Ambiental	34
Quadro 2: Características do setor de saneamento e suas repercussões.....	38
Quadro 3: Mecanismos de remoção de poluentes dos Wetlands Construídos.....	60
Quadro 4: CAPEX e OPEX para as tecnologias estudadas para o equivalente populacional de 150 pessoas, para a realidade de mercado brasileiro e sob um horizonte de projeto de 15 anos*	66
Quadro 5: Resumo do custo do ciclo de vida das ETE's dos cenários estudados*	69
Quadro 6: Vantagens dos Sistemas Wetlands Construídos.....	71
Quadro 7: Desvantagens dos Sistemas Wetlands Construídos	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	15
2	DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL	16
3	VERTENTES TEÓRICAS	20
3.1	A ECONOMIA AMBIENTAL	20
3.1.1	A Economia dos Recursos Naturais.....	22
3.1.2	A Economia da Poluição.....	25
3.2	A ECONOMIA ECOLÓGICA.....	27
3.3	DIVERGÊNCIAS ENTRE AS TEORIAS	33
4	SANEAMENTO NO BRASIL.....	37
4.1	A IMPORTÂNCIA DO SETOR PARA O DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL.....	43
4.2	LEGISLAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS SOBRE O SETOR	47
5	OS SISTEMAS <i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDOS.....	53
5.1	COMPONENTES FUNDAMENTAIS DOS <i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDOS	57
5.1.1	Material Suporte	58
5.1.2	Macrófitas Aquáticas.....	58
5.1.3	Micro-organismos	60
5.2	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	61
6	CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO	65
7	VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS SISTEMAS <i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDOS	71
8	<i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDOS COMO SOLUÇÃO DESCENTRALIZADA À LUZ DAS VERTENTES TEÓRICAS	81
9	CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS.....	92

1 INTRODUÇÃO

A busca pela universalização do acesso ao esgotamento sanitário adequado no Brasil é uma problemática ainda em debate pelo aporte complexo que requer o seu alcance. Desafios como a necessidade de elevados investimentos em infraestrutura, carência de serviços regulatórios eficientes, falta de foco nas proporções mais carentes da população, necessidade de políticas públicas voltadas ao setor e a ausência de interesse político resultam numa parcela preocupante da população sem coleta e tratamento de esgoto. Segundo o Instituto Trata Brasil (2022), 57,3% da população brasileira revelou ter acesso à rede coletora de esgoto em 2019 na pesquisa PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios. Dado corroborado pelo SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – em 2020, em que 55% da população apresentou ter acesso aos serviços de coleta de esgoto. O relatório do Plansab – Plano Nacional de Saneamento Básico – (Brasil, 2019a) indica que o déficit relativo é maior nas zonas rurais, comparado às zonas urbanas, com 48,6% de domicílios com fossas rudimentares e 11,7% despejando em valas e outros destinos. Este cenário afeta diretamente a saúde pública da população ao favorecer a proliferação de doenças e a degradação dos recursos hídricos como com a contaminação de lençóis freáticos. Além disso, a falta de uma precisão na titularidade de serviços pautam um novo marco regulatório do saneamento, o que demonstra a urgência na busca de soluções que permitam o rápido alcance da universalização.

Diante de tal problemática, o sistema de terras alagadas ou *Wetlands* Construídos, também conhecido como terras úmidas construídas, pode ser considerado uma solução de acesso tanto à coleta e tratamento de efluentes como de recurso hídrico de qualidade para irrigação. As terras alagadas são uma forma de tratamento de águas residuais que simula um ecossistema do tipo pântano, com uso de plantas na melhoria da qualidade dos efluentes e do solo (Barreto, 2016), de maneira natural, ou seja, sem adição de produtos químicos e com o aproveitamento de microrganismos e serviços de depuração ecossistêmicos. Os *Wetlands* Construídos proporcionam um tratamento de esgoto eficaz, a baixos custos energéticos e de fácil acesso às famílias de pequenos agricultores. Originado na Alemanha na década de 1950 pelo cientista Käthe Seidel do Instituto Max Planck, o sistema foi projetado para retirar fenol e diminuir a carga orgânica de efluente de laticínios (Cunha; Severiano Junior, 2018). É hoje uma prática já utilizada em diversos outros países, principalmente na Europa, para substituir as estações de tratamento de esgoto convencionais, para despoluição de rios, para abastecimento

de água ou, como utilizado no *Parc du Chemin-de-l'île*, na França, para remoção de contaminantes do Rio Sena (Lazo Arquitetura, 2017). Começou a ser difundido no Brasil em 1980 e sua utilização se intensificou a partir do ano 2000 (Sezerino, 2015) por pesquisas acadêmicas e empresas privadas, como a *Wetlands Construídos Ltda.*, de Belo Horizonte – MG.

Normalmente utilizadas para suprir demanda de municípios com até 15 mil habitantes no Brasil (*Wetlands Construídos Ltda.*, 2021), as terras úmidas construídas propõem eficiência operacional com fácil manutenção, baixos custos operacionais e harmonia paisagística, sem gerar impacto de vizinhança com odores indesejáveis. Ou seja, viáveis para áreas rurais de pequenas comunidades, como de agricultura familiar. As terras alagadas são compreendidas, então, como tecnologia social em prol da sustentabilidade em seus três pilares: social, econômico e ambiental (Domingos; Berreta; Reis, 2018). Entretanto, conforme afirma André Baxter Barreto em entrevista para a Revista *Tae*, o sistema ainda é visto com receio no Brasil devido ao risco de contaminação de alimentos pelo reuso do efluente tratado, então a prática não é amplamente difundida (Rubim, 2017). Assim, o problema de pesquisa se expressa com a pergunta: como o sistema *Wetlands Construídos* pode contribuir para o alcance da universalização do acesso ao esgotamento sanitário no Brasil?

A relevância do tema se dá pela própria necessidade de normalização de mais soluções sociais, naturais e econômicas no país. A justificativa para a execução da dissertação está na contribuição teórica para o avanço da Economia Ecológica e da Economia Ambiental, principalmente na discussão sobre Soluções baseadas na Natureza, como *Wetlands Construídos* e o aumento de sua visibilidade seja por pesquisadores, formuladores de políticas públicas ou demais agentes econômicos. Não somente, há a importância prática da pesquisa ao indicar uma solução real de melhoria na vida dos brasileiros ou qualquer outra população que sofra com falta de acesso a esgotamento sanitário.

Este trabalho é uma pesquisa descritiva de abordagem qualitativa (Gil, 2008). Para a investigação na literatura da dinâmica dos sistemas *Wetlands Construídos* (WC) e sua relação com os pressupostos norteadores da Economia Ambiental e da Economia Ecológica, foi realizada uma pesquisa bibliográfica no portal de periódicos CAPES e entre as principais obras de autores da área, seja na base de dados do GESAD/UFSC – Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado, responsável pelo *Wetlands Brasil* – seja em Manuais e Dissertações sobre a tecnologia. Da mesma forma, será realizado o levantamento para composição da discussão

teórica da Economia Ecológica e da Economia Ambiental, principalmente entre obras de autores que deram origem às disciplinas.

A pesquisa bibliográfica foi realizada através de uma revisão sistêmica que se inicia com a busca no portal de periódicos CAPES. As palavras-chave selecionadas foram “*wetlands* construídos”, “*constructed wetlands*” e “*humedales construidos*”, suas versões em inglês e espanhol. Apesar das diversas variações para o nome da tecnologia, a escolha da palavra-chave visa o uso mais frequente nas pesquisas e manuais nacionais. Como ocorre em “*Wetlands* Construídos como Ecotecnologia para o Tratamento de Águas Residuárias: Experiências Brasileiras” (Sezerino; Pelissari, 2021) e na obra “Dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil. Documento de consenso entre pesquisadores e praticantes” (Von Sperling; Sezerino, 2018). Foram selecionadas também as palavras-chave “agricultura” e “*agriculture*”, em qualquer campo, na tentativa de abarcar a temática do reuso.

Os resultados iniciais somam 4.244 obras diversas, e então, são selecionados os padrões de busca “periódicos revisados por pares”, “artigos”, sobre o assunto “*Wastewater Treatment*”, entre os idiomas português, inglês e espanhol. As bases de dados selecionadas foram Academic Search Premier, Scielo Brazil e Latindex, por abranger os países dos idiomas pesquisados e pela sua notoriedade nacional e internacional. A pesquisa final resulta em 58 artigos selecionados. Após leitura e avaliação de títulos e resumo, 3 artigos são excluídos por serem duplicados. Os 55 artigos restantes são selecionados de acordo com a abordagem dos assuntos: *wetlands*, reuso e agricultura. Assim, a pesquisa resultou em 9 artigos científicos para análise, o que não exclui a análise de trabalhos notórios sobre o tema que escapam às bases de dados referidas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Inferir como a tecnologia do sistema *Wetlands* Construídos pode contribuir para o alcance da universalização do acesso ao esgotamento sanitário no Brasil.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Expor as vertentes teóricas da Economia Ambiental e da Economia Ecológica;
- b) Investigar a dinâmica dos sistemas *Wetlands* Construídos como tratamento de esgoto e sua relação com os pressupostos norteadores da Economia Ambiental e da Economia Ecológica;
- c) Analisar teoricamente como a tecnologia do sistema *Wetlands* Construídos pode contribuir para o alcance da universalização do acesso ao esgotamento sanitário no Brasil.

A fim de atingir o objetivo proposto, este trabalho será estruturado entre nove seções principais. Esta primeira seção abarca a introdução ao problema de pesquisa, com os elementos de contextualização e justificativa, o objetivo geral e os objetivos específicos. O referencial teórico é introduzido através da segunda seção, sobre a problemática ambiental acerca do desenvolvimento econômico sustentável. Já a terceira seção aborda as vertentes teóricas da Economia Ambiental e da Economia Ecológica, com seus fundamentos, abordagens e discrepâncias. A quarta seção apresenta o contexto do setor de saneamento básico no Brasil, sua importância para o desenvolvimento econômico e social, a legislação e políticas públicas que abrangem o setor. A quinta seção abarca a descrição e a literatura acerca do sistema *Wetlands* Construídos em formato de tópicos. A sexta seção apresenta levantamentos na literatura sobre os custos de implantação e operação da tecnologia. A sétima seção apresenta um levantamento sobre as vantagens e desvantagens do sistema citados na literatura. A oitava seção discursa e analisa o sistema como solução descentralizada para a universalização de acordo com a literatura e à luz das teorias econômicas vistas. Por fim, apresentam-se as conclusões na última seção.

2 DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL

Os recursos naturais estiveram presentes na análise dos economistas clássicos desde o início da ciência econômica, porém nunca de forma aprofundada, mas até negligenciada. Segundo Hunt e Lautzenheiser (2013) e Mattei (2011), os fisiocratas ditavam que somente o produto da terra cria valor. David Ricardo explanou sobre a renda da terra com a pressão populacional levando à utilização de terras cada vez menos produtivas e férteis (Ricardo, 1996). Marx (1996) afirmou que o trabalho humano é coadjuvante das forças da natureza, apesar de não aprofundar sobre o relacionamento do ser humano com a natureza. Smith não deu enfoque ao meio ambiente, além do fato de que o trabalho humano age sobre os fatores da natureza para produzir bens e criar valor (Smith, 1996). Entretanto, a preocupação com o avanço de um crescimento econômico ilimitado já existia, com a postulação de um ‘estado estacionário’ citado por John Stuart Mill, Ricardo e Smith. A finitude dos recursos naturais e os decréscimos de produtividade marcavam a chegada deste estado de estacionariedade.

A chamada questão ambiental borbulhou no cenário internacional após o Clube de Roma em 1968, grupo de discussão composto por cientistas, industriais e políticos. Com o objetivo de estudar o esgotamento dos recursos naturais em vista do crescimento populacional e industrial, o grupo culminou no lançamento no ano de 1972 da obra “Os Limites do Crescimento”, organizado por Donella Meadows e também conhecido como Relatório Meadows ou Relatório do Clube de Roma (Club of Rome, 2022). Assim como a obra “Primavera Silenciosa” de Rachel Carson, lançada na década de 1960, relatava a existência de um limite biofísico ao crescimento econômico devido à finitude do planeta Terra e seus fluxos de energia e matéria (Franco, 2018).

Entretanto, a proposta de crescimento zero do grupo de Roma foi duramente criticada pois negligencia o desenvolvimento social e a busca pela igualdade ao não incluir em suas premissas alterações qualitativas no desenvolvimento de diferentes regiões. Além de focar na expansão populacional e no crescimento econômico em si e de não citar soluções para o modo de produção vigente, o sistema econômico capitalista (Barbosa, 2008).

O debate avança com conferências e acordos internacionais tais como a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente em 1972, Estocolmo, onde o conflito entre países considerados desenvolvidos e em desenvolvimento gerou a Declaração sobre o Meio Ambiente Humano (ONU, 1972). A Declaração relaciona a pobreza com a degradação ambiental, além

de excluir a responsabilidade dos países ricos. É evidente que a preocupação com a preservação dos ecossistemas e com o altruísmo intergeracional começa a se mostrar presente, porém a problemática social da desigualdade requer uma visão robusta de desenvolvimento econômico que só se mostra presente nos anos posteriores. A Conferência também aprovou a criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA – para o monitoramento do estado do meio ambiente e recomendação de condutas sustentáveis.

A primeira forma conceitual do paradigma do desenvolvimento sustentável foi introduzida com a palavra “ecodesenvolvimento”, citada a primeira vez por Maurice Strong (Montibeller Filho, 1993), e remete ao desenvolvimento com foco nas particularidades das regiões. Nas palavras de Ignacy Sachs (1986, p. 18):

O estilo de desenvolvimento que, em cada ecorregião, insiste nas soluções específicas de seus problemas particulares, levando em conta os dados ecológicos da mesma forma que os culturais, as necessidades imediatas, como também aquelas de longo prazo. (Sachs, 1986, p. 18).

Desta forma, Sachs antagoniza com a economia convencional e abre caminho para um novo pensar do desenvolvimento econômico. Em uma visão holística, o desenvolvimento proposto por Sachs prioriza um projeto social com a luta por um meio ambiente ecologicamente equilibrado, através do planejamento participativo. Uma ruptura deste novo conceito de desenvolvimento sustentável ocorreu durante o *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources* – IUCN, em 1980. Através da publicação do documento *World Conservation Strategy*, a expressão ‘desenvolvimento sustentável’ foi relacionada inteiramente à conservação da diversidade genética e dos processos ecológicos, negligenciando a problemática social e institucional, por exemplo (Barbosa, 2008).

Com a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) criada em 1987 pela ONU – Organização das Nações Unidas – o novo modelo de desenvolvimento sustentável volta a evoluir. A líder norueguesa Gro Harlem Brundtland toma a frente da Comissão e da elaboração do relatório “Nosso Futuro Comum”, que também foi conhecido por Relatório Brundtland, que destaca o atributo ético com a preocupação sobre as necessidades das gerações futuras e medidas sustentáveis no âmbito das regulamentações de empresas, lançamento de padrões ambientais e incentivos. Desde então, o desenvolvimento sustentável é popularizado através de três dimensões principais: sustentabilidade ambiental, social e econômica (Medeiros, 2016). A simplicidade e amplitude do conceito atribui rápida

disseminação no uso do termo “desenvolvimento sustentável”. Nas palavras de Mueller (1998, p. 282): “Quem não vê com simpatia a combinação da eficiência, com a equidade e a sustentabilidade ecológica?”.

O Brasil entra em destaque com a realização da Cúpula da Terra, Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), no Rio de Janeiro em 1992. A Conferência intitulada de Rio-92 ou Eco-92 resultou em diversos documentos como a famosa Agenda 21 e a Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, que acaba por reforçar aspectos antropocentristas já vistos na Conferência de Estocolmo. Entretanto, a nova Declaração inclui o princípio do desenvolvimento igualitário entre os países e entre as gerações presentes e futuras. A erradicação da pobreza se torna essencial e os países desenvolvidos são responsabilizados pela depredação global, com a atuação dos Estados cada vez mais presente nas propostas de resolução do problema.

Outros progressos importantes são feitos na Rio-92, como a menção ao Princípio da Precaução, importante conceito para os economistas ecológicos, que dita a tomada de decisões “quando houver ameaça de danos graves ou irreversíveis, a ausência de certeza científica absoluta não será utilizada como razão para o adiamento de medidas economicamente viáveis para prevenir a degradação ambiental” (CNUMAD, 1992).

Com o passar dos anos seguiram as realizações de demais Conferências das Nações Unidas, chamadas de Conferências das Partes desde 1995 com a ocorrência da COP-1 em Berlim – Alemanha. Desde então, os países participantes procuram alinhar objetivos de sustentabilidade, como metas para diminuição de emissões de gases do efeito estufa, em tratados. O Protocolo de Kyoto, de 1997, é um dos resultados, assim como o Acordo de Paris, de 2015, uma tentativa de limitar o avanço do aquecimento global. Até o momento, a última conferência ocorrida foi a COP-27, realizada em 2022 no Egito, com reforço para aplicação de medidas sustentáveis em face ao relatório de conjuntura apresentado pelo IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.

A conjuntura apresentada pelo relatório do IPCC é de piora do quadro ambiental global. O Capítulo 16 do relatório (IPCC, 2022) aponta piora da crise climática com a identificação de mais de 130 riscos, separados entre 8 áreas: (a) zonas costeiras baixas, (b) ecossistemas marinhos e terrestres, (c) redes e infraestruturas críticas, (d) padrões de vida, (e) saúde humana, (f) segurança alimentar, (g) segurança hídrica e (h) paz e mobilidade. Muitas dessas áreas já sofrem com a intensidade dos eventos climáticos, como nos casos de inundações,

enchentes e os impactos vistos em recifes de corais, onde o relatório aponta estarem além do ponto de não-retorno ou limiar crítico para possível recuperação ambiental.

Os noticiários apresentam as consequências atuais como as chuvas e inundações extremas em diversos países da Europa, China e Brasil (Planellès, 2021) e o forte alastramento dos incêndios florestais nos Estados Unidos, Canadá e Austrália (Kottasová, 2021). A redução da severa magnitude destes riscos dependerá do nível de vulnerabilidade social e da eficiência dos esforços para adaptação. Porém, o estudo afirma que as respostas globais continuam em níveis insuficientes, percebe-se a necessidade de uma teoria econômica de sustentabilidade forte para o encaminhamento de políticas adaptativas efetivas.

Portanto, o capítulo seguinte apresenta duas vertentes da teoria econômica que se dedicam ao assunto da sustentabilidade ambiental, a descrição de seus pressupostos teóricos e o porquê uma é considerada sustentabilidade fraca, enquanto outra é considerada sustentabilidade forte.

3 VERTENTES TEÓRICAS

A discussão ambiental do desenvolvimento econômico sustentável na teoria econômica despertou o surgimento de duas importantes correntes teóricas: a Economia Ambiental, com suas duas abordagens conhecidas como Economia dos Recursos Naturais e Economia da Poluição; e a Economia Ecológica. Neste capítulo, as vertentes teóricas serão expostas desde sua origem, sua visão da relação entre economia e meio ambiente e as divergências que as opõem.

3.1 A ECONOMIA AMBIENTAL

O processo econômico é descrito nos livros-texto convencionais de Economia como um fluxo circular, conectando empresas e famílias que produzem e consomem bens e serviços. Este fluxo circular é, então, fechado e contínuo, sem o registro de trocas com o meio ambiente (Mueller, 1998). Da mesma forma, a função de produção (Cobb-Douglas¹) não inclui os recursos naturais para a fabricação de produtos, com a representação somente de capital e trabalho. De acordo com essa perspectiva, “a economia funcionava sem recursos naturais” (Romeiro, 2010, p. 8).

Os debates entre sistema econômico e meio ambiente passaram a se intensificar com a preocupação ambiental advinda, principalmente, de três eventos: a) da acentuação da poluição e da degradação ambiental em meados da década de 1960, através da forte concentração de indústrias e veículos motorizados em algumas regiões; b) da crise do petróleo na década de 70, com elevação dos preços e da sensação de escassez pela opinião pública; c) do Relatório do Clube de Roma, segundo o qual a continuidade dos padrões de crescimento econômico e populacional ultrapassaria os limites físicos impostos pela restrição dos recursos naturais e da capacidade de assimilação da poluição pelo meio ambiente (Mueller, 1998).

Os recursos naturais passaram a ser incluídos na função de produção, nos modelos descritos por Solow e Stiglitz, porém na forma multiplicativa em que se assume a possibilidade da substituição perfeita entre capital, trabalho e recursos naturais. Deste modo, os limites

¹ Desenvolvida durante a década de 1920 por Paul Howard Douglas e Charles Wiggans Cobb, é uma função de produção que relaciona a quantidade produzida de uma firma com os fatores de produção ou insumos necessários para produzir tal produto (Silveira, 2011).

demarcados pela disponibilidade de recursos naturais poderiam ser indefinidamente superados através do progresso técnico (Romeiro, 2010). Em outras palavras, ao se admitir que é possível substituir os fatores de produção fornecidos pela natureza por máquinas, equipamentos e outros fatores de capital, entende-se que o progresso científico e tecnológico é capaz de fornecer soluções de substituição e transpor a base de fatores de produção da economia sempre que se deparar com limites de escassez.

Nasce a economia ambiental, que não considera os recursos naturais como um limite a longo prazo para a expansão econômica. O sistema econômico é visto como grande o suficiente para a escassez do meio ambiente se apresentar como uma restrição. A restrição existe, mas seria apenas relativa. Uma economia só é considerada “não-sustentável” se a poupança total está abaixo da depreciação dos ativos produzidos e não-produzidos (recursos naturais). Ou seja, o investimento é capaz de compensar as gerações futuras pelas perdas de ativos provocadas pelo nível de produção e consumo correntes – esta é chamada “regra de Hartwick” (Romeiro, 2010).

Ayres e Kneese (1969) afirmam que a economia ambiental se assenta na teoria do balanço dos materiais e da energia. Nesta, os insumos, os alimentos e as matérias-primas utilizadas no sistema econômico se tornam, ao final, resíduos e rejeitos. Sua substância material continua a existir, ou é reaproveitada ou é descartada no meio ambiente. O que ocorre é uma mudança qualitativa através do processo de transformação econômico. Esta visão substitui o fluxo circular por uma representação linear da produção e do consumo. Apesar da teoria permitir uma análise simultânea dos dois aspectos da problemática ambiental, os teóricos ambientais neoclássicos tratam por duas vertentes: a Economia dos Recursos Naturais e a Economia da Poluição. Ambas as abordagens apresentam soluções para a depredação ambiental baseadas no paradigma liberal (Romeiro, 2010). Ou seja, baseadas no utilitarismo, no individualismo metodológico e no equilíbrio: mantêm o foco na maximização da utilidade através das preferências individuais (Amazonas, 2001). A teoria age sobre a crença na racionalidade do indivíduo, o *homo economicus*, em busca de seu bem-estar e, assim, na necessidade de um livre mercado.

O principal fundamento das soluções apresentadas se baseia nos impactos ambientais vistos como falhas de mercado. São externalidades negativas que geram custos sociais que não estão incluídos nos custos privados, principalmente dos agentes privados causadores de

distúrbios ambientais. Logo, a solução seria a internalização destes custos por mecanismos de mercado (Santos; Santos; Carvalho, 2010), seja por sistemas de preços, taxações ou outros.

3.1.1 A Economia dos Recursos Naturais

A Economia dos Recursos Naturais tem como ponto de partida a visão do meio ambiente como provedor de recursos e a busca de um nível ótimo de exploração (Barbosa, 2008). Para os teóricos desta abordagem, os recursos naturais são vistos como ativos financeiros para o processo de produção, assim, o problema da escassez se torna uma questão de alocação intertemporal do uso dos estoques destes recursos. Este problema é resolvido com o cálculo da regra de Hotelling, que afirma que os preços dos recursos naturais devem seguir no mesmo ritmo da taxa de desconto, que é igual à taxa de juros do mercado (Oliveira, 2019). A equação utilizada, segundo Amazonas (2001), é:

$$\frac{\dot{P}}{P} = r, \text{ ou alternativamente: } P_t = P_0 \cdot e^{rt}$$

Sendo:

r = taxa de desconto ou de juros;

P = preço (líquido)

\dot{P} = variação do preço (líquido);

P_0 = preço no tempo 0

P_t = preço no tempo t

Esta regra implica que o estoque das reservas ambientais pode ser controlado sob o mecanismo de preços: ao nível que o esgotamento das reservas se reflete em escassez de recursos para a produção ao longo do tempo, há elevação de preços e diminuição da procura. Em outras palavras, com a elevação de preços a produção deve cair ao longo da curva de demanda. E no caso dos recursos renováveis, inclui-se a taxa de reposição (natural ou através da reciclagem) do recurso (Amazonas, 2001).

Ainda segundo Amazonas (2001), o custo de oportunidade intertemporal, referente às receitas líquidas que devem crescer igualmente à taxa de juros, é chamado de renda da escassez (Amazonas, 2001). Se há a expectativa de que o valor de estoque irá crescer, há uma motivação

para não extrair o recurso no presente e, sim, no futuro. Logo, é determinada a taxa ótima de extração:

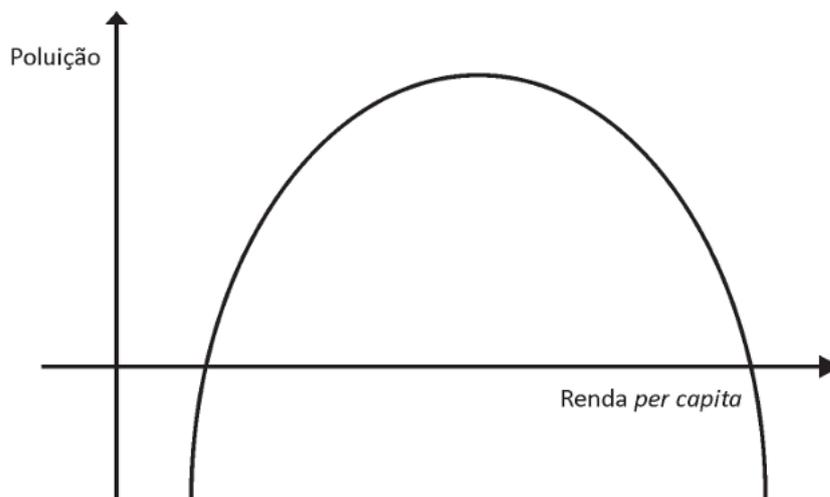
Dado que o valor deste estoque é o valor presente de suas vendas futuras, em equilíbrio intertemporal a taxa de retorno segundo a qual este valor deve crescer é a taxa de juros, e portanto, com base no desconto a esta taxa, determina-se assim as quantidades ótimas a serem extraídas a cada momento no tempo, ou seja, determina-se a taxa ótima de extração. (Amazonas, 2001, p. 29)

Solow (1974) enfatiza a existência de custos diferentes para diferentes fontes de recursos, seja refletindo as diferenças geográficas de acesso e transporte ou diferenças geológicas e químicas que fornecem uma extração mais barata que a outra. Neste caso:

Primeiro, uma fonte opera e supre todo o mercado. Seu preço líquido aumenta exponencialmente e o preço de mercado se move de forma correspondente. Em certo momento, a primeira fonte é exaurida. É neste momento, e não antes, que deve se tornar econômico para a segunda fonte entrar na produção. Deste momento em diante, o mundo está em uma situação de fonte-única: o preço líquido calculado com os custos da extração atual deve subir exponencialmente até que toda a produção sufoque. (Solow, 1974, p. 4)

Nessa lógica econômica, o racional é utilizar as fontes de custos mais baixos antes das mais custosas. No momento em que as fontes mais custosas estiverem servindo ao mercado, o preço de mercado deve cobrir os altos custos de extração e a renda de escassez que cresce exponencialmente. Esse exemplo auxilia no entendimento da relação da curva de demanda, preço de mercado e taxa de extração, quando “a última tonelada produzida será também a última tonelada no chão” (Solow, 1974, p. 3). Solow profetiza que quando isso acontecer, a era do óleo, do zinco ou qualquer que seja a matriz energética, ela terá chegado ao fim. Solow termina sua publicação indicando mais ação do governo para programas de coleta de informações, disseminação de novas tecnologias, de reservas, de demanda e um maior planejamento.

Essa vertente também apresenta a Curva de Kuznets Ambiental, representada no Gráfico 1. Trata-se de uma curva na forma de U invertido que demonstra a relação entre o aumento da renda *per capita* e o nível de degradação do meio ambiente, a poluição. Esta leitura da realidade sugere que nos primeiros estágios de crescimento econômico, quando as economias transicionam da fase agrícola para a industrialização, há uma relação positiva entre o aumento de renda *per capita* e a poluição ou degradação ambiental em geral (Andrade, 2008).

Gráfico 1: Curva de Kuznets Ambiental

Fonte: Romeiro e Maia (2011).

A tese defendida é de que após ultrapassar o ponto de inflexão, um país considerado desenvolvido passa a diminuir a degradação ambiental espontaneamente através de maior acesso à educação, consciência ambiental e sistemas políticos mais abertos, por exemplo (Andrade, 2008). Tal tese é alvo de críticas por ambientalistas e economistas ecológicos, pois indica a permissão para poluir e degradar indefinidamente na espera do encontro de um ponto de inflexão hipotético, incalculável. Essa omissão inicial é capaz de causar danos irreversíveis como perda da biodiversidade e desequilíbrio climático (Medeiros, 2016). Outra crítica é o fato do estudo ter analisado somente dados dos Estados Unidos, Alemanha e Inglaterra (Andrade, 2008), o que pode tornar inverossímil a generalização.

Um elemento central dessa vertente é o papel da tecnologia em produzir substitutos, o que significa que a extração ou utilização ótima não implica necessariamente em exaustão. Um recurso não-renovável deixa de ser extraído quando a tecnologia de substituição se torna viável através do aumento de preços deste recurso. É o conceito de *backstop technology*, a tecnologia capaz de produzir ou substituir um recurso natural, mesmo a um custo relativamente alto, porém sobre uma base efetivamente inexaurível, o que se traduz em um teto ao aumento do preço de mercado do recurso referente (Amazonas, 2001).

3.1.2 A Economia da Poluição

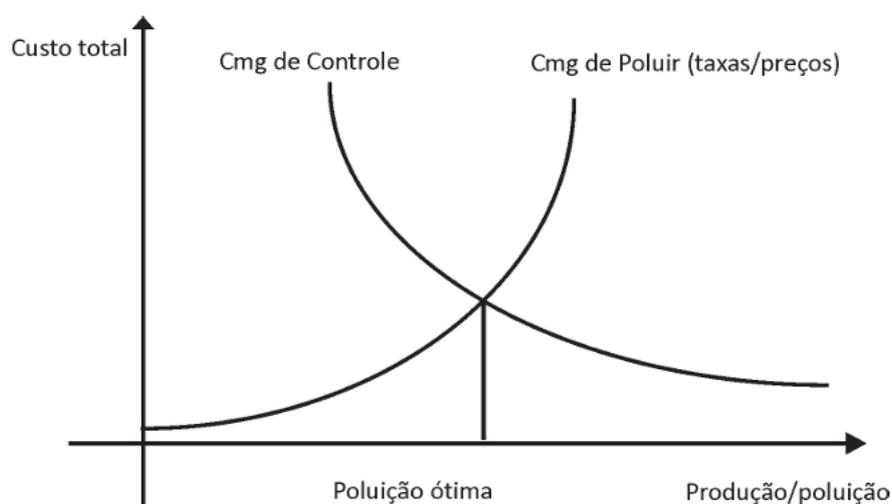
A abordagem da Economia da Poluição tem como ponto de partida a visão do meio ambiente como receptor de rejeitos e da poluição como externalidade negativa. Essa visão nasceu da teoria do bem-estar (*welfare economics*) e dos bens públicos, desenvolvida no início do século XX por Arthur C. Pigou (Andrade, 2010; Amazonas, 2001), considerado pioneiro no estudo da poluição (Oliveira, 2019). Não somente:

Busca também entender quais são os danos causados pela poluição e quais são os custos e benefícios envolvidos na adoção de mecanismos para o seu controle. Em última instância, a Economia da Poluição tenta apreender quais são suas implicações na geração da eficiência de Pareto. (Andrade, 2010, p. 9).

As soluções apresentadas pela Economia da Poluição se firmam em correções das imperfeições do mercado realizadas pelo Estado, através de negociações coaseanas, taxas pigouvianas, multas e indenizações a comunidades e indivíduos afetados pela poluição. As negociações coaseanas têm origem na solução de Ronald Coase de 1960, em que é possível a livre negociação das partes envolvidas. Sob a hipótese de que maiores reduções na poluição levam a maiores custos marginais (para controle ambiental), menor será o benefício marginal da parte afetada. Desta forma, a negociação ocorrerá até o ponto ótimo onde o custo marginal de reduzir a poluição será igual ao benefício marginal de reduzi-la (Santos; Santos; Carvalho, 2010). Neste caso, a solução depende da definição clara de direitos de propriedade, o que implica na privatização de recursos naturais incluindo água e ar (Romeiro, 2010).

Já a taxa pigouviana consiste na valoração econômica da degradação do meio ambiente, a partir de uma curva marginal de degradação e da imposição destes valores pelo Estado através de taxas. Logo, cria-se um *trade off* entre os custos marginais de controle da poluição e os custos dos impactos ambientais ou externalidades de suas atividades produtivas, que o agente econômico passa a internalizar por meio do pagamento das taxas correspondentes.

O agente, ao procurar minimizar seus custos totais, encontra o equilíbrio no ponto de “poluição ótima” no encontro da curva de custos marginais de degradação ambiental (crescente) com a curva de custos marginais de controle (decrecente), como demonstra o Gráfico 2 (Romeiro, 2010).

Gráfico 2: Curva de Poluição Ótima

Fonte: Romeiro e Maia (2011).

A valoração econômica é uma ferramenta chave na aplicação das soluções da Economia da Poluição para mensurar os custos e benefícios ambientais. Ao utilizar fundamentos microeconômicos, os métodos de valoração dividem-se entre os métodos da função de produção e os métodos da função de demanda. Os primeiros são: os métodos da produtividade marginal e de mercados de bens substitutos (reposição, gastos defensivos ou custos evitados e custos de controle). Os segundos são: métodos de mercado de bens complementares (preços hedônicos e do custo de viagem) e método da valoração contingente. O método da valoração contingente consiste na revelação das preferências dos consumidores baseadas em mercados hipotéticos, origem da denominação “contingente”. Os métodos de valoração são utilizados para a gestão ambiental, através da análise de custo-benefício, da análise de custo-utilidade e da análise de custo-eficiência. As duas primeiras têm o objetivo de determinar prioridades e a última determina ações, enquanto as prioridades já estão definidas (Motta, 1997).

O mercado de carbono é um exemplo desta vertente que foi amplamente difundido. Criado como um instrumento para redução de emissão de gases do efeito estufa (GEE) através de mecanismos de compensação ambiental desde a assinatura do Protocolo de Quioto em 1997, o mercado de carbono inicia uma tentativa de “financeirização da natureza”. Ao precificar e criar créditos de carbono, empresas podem comprar permissões para poluir, enquanto o aporte financeiro arrecadado é voltado para ações de compensação (Mecanismo de Desenvolvimento

Limpo ou MDL) como reflorestamento e ampliação de tecnologia limpa como energia solar e eólica (Santana; Souza, 2018).

Em oposição à teoria neoclássica da Economia Ambiental, origina-se a Economia Ecológica, que passa a criticar a abordagem da Economia dos Recursos Naturais e as ferramentas de controle da degradação ambiental apresentadas pela Economia da Poluição. A singular teoria apresenta um novo olhar, sob um novo paradigma que envolve conceitos da física e da ecologia, descrito na próxima subseção.

3.2 A ECONOMIA ECOLÓGICA

A Economia Ecológica é uma vertente do pensamento econômico que surgiu ao final das décadas de 1960 e 1970 junto da emergência da problemática ambiental, principalmente após o choque do petróleo, na busca de uma nova ótica ao desenvolvimento econômico vigente (Amazonas, entre 1999 e 2001). Efetivamente consolidada como corrente de pensamento econômico no ano de 1988 com a criação da *International Society for Ecological Economics* (ISEE), a Economia Ecológica é definida como campo de estudo transdisciplinar que integra conceitos da economia, da ecologia e de disciplinas correlacionadas em uma análise integrada da economia como subsistema de um ecossistema global e finito (Amazonas, entre 1999 e 2001; Martinez-Alier, 2015).

A construção teórica da Economia Ecológica inicia com os trabalhos de Nicholas Georgescu-Roegen, como “The Entropy Law and the Economic Process” (1971), de Kenneth Boulding, como “The Economics of the Coming Spaceship Earth” (1966) e de Howard Thomas Odum, com sua contribuição sobre o uso de energia na economia e na ecologia, entre outros autores. (Amazonas, entre 1999 e 2001; Martinez-Alier, 2015).

Odum (1998) desenvolveu o conceito de emergia, uma medida sobre a quantidade de energia incorporada passível de produzir um recurso, seja ele material, energético ou de serviços. A ideia de emergia permite calcular e analisar a produção e distribuição de produtos e serviços através de unidades de energia necessária. Esta “teoria do valor-energia” seria uma forma de submeter a análise econômica à lógica ecológica e às leis da termodinâmica em uma contabilidade ambiental, o que facilita o cálculo de índices de desempenho e sustentabilidade (Amazonas, entre 1999 e 2001; Waldhlem; Azenha; Vargas, 2016). Uma crítica importante sobre tal teoria é o modo reducionista de análise, assim como a valoração de bens ambientais.

Calcular todos os recursos sobre a mesma unidade de valor comum, seja ele precificado ou ambiental, oculta as diferenças qualitativas e a insubstituibilidade entre os fatores (Georgescu-Roegen, 2012). Porém, é um método interessante para a comparação e tomada de decisão entre matrizes energéticas e sistemas produtivos, como a atual pegada ecológica².

Outra importante contribuição é o trabalho “The Economics of the Coming Spaceship Earth”, no qual Kenneth Boulding (1966) declara que houve uma mudança de paradigma que a ciência teve dificuldade de incorporar. Antes das grandes descobertas científicas e das navegações, a Terra era considerada plana e ilimitada. Após as evidências de uma Terra redonda e limitada, os economistas não acompanharam a transição de paradigma, do planeta Terra como um sistema aberto para um sistema fechado, onde a economia é um subconjunto deste sistema maior e limitado. A grande diferença de pensamento é que no primeiro paradigma chamado por Boulding de “economia de cowboy”, o sistema econômico não seria capaz de impactar o ecossistema a que pertence. Já no segundo, chamado de “economia da espaçonave”, o sistema econômico seria robusto o suficiente para ameaçar a própria continuidade e a sobrevivência de seus tripulantes devido à finitude do estoque de recursos. Como nos encontramos na segunda realidade, uma menor produção e consumo seria mais prudente.

Da mesma forma, Georgescu-Roegen (2012) preconizava o entendimento do sistema econômico como subconjunto do ecossistema terrestre, em uma crítica ao convencional fluxo circular de produção e consumo. Segundo o autor, o processo econômico somente tem a capacidade de modificar as características qualitativas dos recursos que absorve da natureza e, ao final deste processo, retorna rejeitos ao meio ambiente. Com base na lógica da termodinâmica, a economia não é um sistema isolado, e sim um sistema aberto que troca matéria e energia com a natureza. Portanto, a teoria multidisciplinar tem seu berço também na oposição à teoria ambiental neoclássica.

A primeira lei da termodinâmica é o princípio da conservação. Esta indica que o total de energia de um sistema isolado, aquele que não recebe trocas de matéria e energia, permanece constante. Ou seja, nenhuma energia nova é criada, a energia do sistema é apenas transformada. Já a segunda lei da termodinâmica é a lei da entropia. A definição de entropia se resume à energia utilizável e indica como a energia está disponível para uso humano. Então, a energia

²Pegada ecológica é um conceito criado por Mathis Wackernagel e William Rees em 1990, atualmente reconhecido internacionalmente como uma forma de medir a utilização dos recursos naturais do planeta (Scarpa; Soares, 2012).

pode ser classificada como de baixa entropia, aproveitável para manipulação e utilização, ou como de alta entropia, não aproveitável para realizar trabalho. Neste sentido, “a essência da Lei da Entropia é que a degradação da energia tende a um máximo em sistema isolado, e que tal processo é irreversível” (CECHIN; VEIGA, 2010, p. 441). O que significa que um processo de dissipação ocorre com a utilização da energia de baixa entropia e um aumento da entropia total do sistema. Se considerarmos a baixa entropia como energia livre e alta entropia como energia presa, os organismos vivos absorvem energia livre e dissipam energia presa, do mesmo modo trabalha o sistema econômico.

De acordo com o entendimento termodinâmico, o planeta Terra é um sistema fechado sem trocas de matéria com o exterior, mas com troca de energia – como a energia solar. O sistema econômico, então, é um sistema aberto com trocas de matéria e energia com o sistema ambiental, onde os fatores possuem diferentes características para produção, como a água e a terra, e entram no processo econômico como recursos de valor. Assim, a Economia Ecológica é de extrema importância para os estudos não somente destes recursos escassos, como de gestão de resíduos, pois também considera o fluxo de saída do processo econômico composto dos resíduos que retornam à natureza. Em uma problemática que engloba ambas áreas da esfera econômico-ambiental, é uma teoria econômica que permite uma análise ampla, multidisciplinar e rigorosa do objeto de estudo. A economia não é vista aqui como exógena ao meio ambiente, muito menos com uma visão mecanicista do seu processo econômico, ao risco de desconsiderar os impactos sociais e ambientais críticos já presenciados.

Georgescu-Roegen (2012) considera que, segundo a lei da entropia, a geração de resíduos e poluentes pode até ser reduzida com a eficiência de processos como a reciclagem e o tratamento de resíduos, porém nunca será totalmente convertida. Da mesma forma que não existe o moto-perpétuo ou moto-contínuo – uma máquina que trabalhe indefinidamente sem reposição de energia – não existe a reciclagem completa da matéria. Todo processo de conversão de resíduos materiais sofre um desgaste natural ou uma dissipação de energia, em algum momento, assim, o material sofrerá o desgaste total ou a reciclagem deixará de ser econômica, com maiores gastos energéticos para o procedimento do que para a confecção de um novo produto semelhante. A resposta, portanto, está na estimação, no estudo, no monitoramento e controle dos resíduos, de forma que não ultrapassem a capacidade de suporte do ecossistema – o limite máximo que o meio ambiente suporta dos impactos nele infligidos.

Outro conceito do precursor da EcoEco é sobre acessibilidade, a entropia que define a energia utilizável nem sempre está de fácil acesso para o trabalho humano. Tanto energia quanto matéria têm seu rendimento atrelado ao nível de acessibilidade: “se a energia utilizável tem algum valor para a humanidade, é na medida em que ela também esteja acessível” (Georgescu-Roegen, 2012, p. 86). O autor toma como exemplo a extração do xisto betuminoso, pois sua extração depende de técnicas avançadas e gastos de energia e recursos em níveis não-econômicos, além do alto risco de poluição e perda de recursos hídricos valiosos.

Os principais pressupostos da Economia Ecológica incluem: a) o reconhecimento da disposição limitada de recursos naturais na Terra, que destes depende o funcionamento do sistema econômico tanto para o fornecimento de matéria-prima como para a disposição de resíduos; b) a consideração das diferenças qualitativas entre os fatores de produção, como a não substituição entre terra e trabalho, inclusive a noção de complementaridade do capital reprodutível e humano em relação aos recursos naturais; c) a importância dos serviços ecossistêmicos, como a capacidade de depuração dos rios.

De maneira geral, os três objetivos que norteiam a Economia Ecológica são: a sustentabilidade ecológica, a distribuição social e o uso eficiente dos recursos, num novo paradigma de desenvolvimento econômico sustentável que se opõe à busca pelo crescimento econômico ilimitado, como pregava o precursor da teoria, Georgescu-Roegen (2012). Além disso, dentre os métodos e instrumentos visados pelos economistas ecológicos, encontra-se o estudo da aplicação de políticas públicas ambientais, com base no Princípio da Precaução, o desenvolvimento de novos indicadores e índices de sustentabilidade na economia, a macroeconomia ecológica, avaliação da capacidade de carga – o limite populacional ou material – dos ecossistemas, a discussão sobre a valoração e externalidades recorrentes sobre serviços ambientais, e sua possível incomensurabilidade, avaliação de riscos incluindo métodos de decisão multicritérios e participativos (Martinez-Alier, 2015).

Certa divergência teórica é presente entre os economistas ecológicos e indica não somente o incentivo à pluralidade como a não rigidez de uma revolução no paradigma econômico que permite o seu constante aperfeiçoamento. Os caminhos para o encontro dos objetivos da EcoEco podem divergir, porém são estes objetivos, a constante crítica ao modelo de produção vigente e a crença no limite físico para produção que mantêm a convergência teórica dos cientistas no ramo. A diversidade presente entre as abordagens da teoria recente se encontra, principalmente, nas proposições práticas e políticas (Barbosa, 2008). Como ocorre

com a proposta da economia de estado estacionário de Herman Daly, rejeitada por Georgescu-Roegen.

Na proposta política de Herman Daly (1989 e 2013) de um sistema econômico em equilíbrio com o ecossistema terrestre, o crescimento zero seria a solução. Em uma economia do estado estacionário, baseada no conceito de estacionariedade de John Stuart Mill, os níveis de população e capital devem se manter estáveis e, para isso, os níveis de saída devem ser iguais aos níveis de entrada dos recursos na economia. Emerge a definição de transumo ou *throughput*, fluxo de entrada de recursos – tanto materiais como energéticos – no processo econômico que, após sua transformação e utilização, retornam para a natureza como fluxos de saída ou resíduos. A taxa de transumo nesta economia deve se manter mínima através da redução no consumo de supérfluos, do reuso de produtos e da reciclagem. O estoque de recursos deve ser suficiente para manter um nível satisfatório de vida da população, assim somente a taxa de serviços poderia se manter em nível máximo.

Não somente, o desenvolvimento econômico deve considerar as divergências socioeconômicas entre os países. Para Daly (1989), o crescimento produtivo nos países subdesenvolvidos se traduz em utilidade marginal crescente, com a satisfação das necessidades básicas, e nos países desenvolvidos se traduz em utilidade marginal decrescente, com satisfação de vontades supérfluas. Assim, em uma cooperação mundial, os recursos devem ser distribuídos para reduzir as desigualdades e induzir os países a uma condição estacionária de estoques suficientes de capital e população que permitam qualidade de vida para todos. O objetivo é uma alta expectativa de vida da população, durabilidade de bens, eficiência na utilização dos recursos e diminuição do tempo gasto com produção – o que condiciona a menores horas trabalhadas e maior tempo livre para o ócio e a qualidade de vida. Além de outras medidas pontuais como internalização de custos de externalidades negativas, preços estabelecidos para contribuição ao meio ambiente e reservas bancárias obrigatórias a 100% (Daly, 2013).

No novo modelo, o desenvolvimento ético, moral e educacional teria maior importância do que o acúmulo de riqueza material. Christian Kerschner (2009) resume que o estado estacionário de Daly necessita de três instituições: a primeira para a estabilização do nível populacional, a segunda para estabilização dos recursos físicos e manutenção do transumo dentro os limites definidos pela Economia Ecológica, a terceira para a redistribuição e limitação da desigualdade. Kerschner critica o modelo ao afirmar que este se estabelece sobre pressupostos da economia convencional, que divergem da Economia Ecológica, ao depender

do mecanismo de preços, da propriedade privada e de um “Estado Necessário” internacional. O estado estacionário foi arquitetado, ainda, sem considerar o efeito de heranças, de sociedades anônimas e grandes acionistas no acúmulo de capital, por exemplo.

Georgescu-Roegen (2012) tece críticas densas sobre o modelo do estado estacionário e afirma que o “erro crucial” é não perceber que o estado estacionário, e até um estado decrescente, não pode durar para sempre, já que os recursos naturais continuam finitos. O planeta Terra segue como um sistema fechado, somente com trocas de energia solar e um estoque de matéria finito. De acordo com a quarta lei da termodinâmica, a entropia da matéria tende para o máximo do sistema fechado. Ou seja, mesmo com uma dispensa cheia e o consumo parcimonioso, em algum momento a ida ao mercado será necessária ou a fome passará a reinar. O estado estacionário não traz soluções para o uso e a acessibilidade de recursos esgotáveis e continua a depender da inovação tecnológica constante. A seu favor, a teoria estacionária ilumina o pensamento econômico-ecológico ao redor de novas propostas sustentáveis.

Ao fim, devido à natureza entrópica do processo econômico, os resíduos finais são inevitáveis. A resposta para o problema pode estar em uma relação entrópica menos deficitária, regida pela fonte de energia solar e processos biológicos através de recursos naturais renováveis. A proposta de Georgescu-Roegen é, assim, o decrescimento econômico. Claro que a humanidade não poderia retornar de sua evolução técnica e científica, mas determinar a atividade econômica de acordo com os limites naturais e alavancar técnicas menos deficitárias a níveis globais são possibilidades, assim como já ocorre com regulamentações ambientais e mudanças de matrizes energéticas locais. Em suas palavras: “na realidade, a verdadeira defesa do meio ambiente deve estar centrada no índice global de esgotamento de recursos (e no índice de poluição que dele decorre)” (Georgescu-Roegen, 2012, p. 105). E, não somente, “(...) uma análise termodinâmica salienta que o tamanho desejável da população é aquele que uma agricultura exclusivamente orgânica pudesse alimentar” (Georgescu-Roegen, 2012, p. 155).

A nova visão do sistema econômico e da questão ambiental apresentada pela Economia Ecológica se contrapõe à Economia Ambiental em seus fundamentos básicos e em suas abordagens de resolução da problemática. O entendimento de suas discrepâncias facilita a compreensão de seus pressupostos principais. Logo, a subseção seguinte evidencia as principais divergências entre as vertentes teóricas analisadas.

3.3 DIVERGÊNCIAS ENTRE AS TEORIAS

Um novo paradigma do desenvolvimento requer uma base teórica de sustentabilidade forte, crítica ao modo de produção econômico vigente e oposto ao paradigma do crescimento ilimitado, para inspirar mudanças reais capazes de alterar o rumo do ecossistema global. A diferenciação entre sustentabilidade fraca e forte foi criada pelo economista David Pearce em 1989. Neste sentido, a sustentabilidade considerada fraca é aquela vinculada ao paradigma ortodoxo e neoclássico do pensamento econômico, a Economia Ambiental. Já a sustentabilidade considerada forte é aquela vinculada ao paradigma heterodoxo do pensamento econômico, como a Economia Ecológica (Macedo, 2018).

A Economia Neoclássica Ambiental é considerada sustentabilidade fraca, principalmente por não considerar a escassez dos recursos naturais limitante ao crescimento econômico. Ao possuir uma visão otimista do processo de exaustão ecológico e se apoiar em pressupostos da economia neoclássica, esta vertente considera a evolução das inovações tecnológicas capaz de superar os limites impostos pela natureza ao crescimento econômico. Como afirma o economista ecológico Martinez-Alier (2015, p. 10):

Descontamos o futuro porque supomos que o futuro será mais próspero; portanto, destruímos mais recursos não renováveis hoje e poluímos mais que em outras condições, comprometendo a prosperidade futura. Isso tem sido chamado do “paradoxo do otimista”.

A problemática em torno do paradoxo do otimista é a não consideração de futuros problemas com a escassez de recursos, tanto matéria-prima para produção de bens como água e alimentos, essenciais à manutenção da vida. De outro lado, há também a não preocupação a longo prazo com externalidades negativas decorrentes do atual uso indiscriminado dos recursos do meio ambiente, como poluição e degradação ambiental que elevam os custos sociais e ambientais da produção econômica. A crítica de base econômico-ecológica em relação ao pressuposto básico da economia neoclássica de equilíbrio devido a um livre mercado pode, então, ser resumida na frase: “mercados são míopes, descontam o futuro, não enxergam as escassezes futuras” (Martinez-Alier, 2015). As teorias e o ativismo de sustentabilidade forte, como a Economia Ecológica, denotam maior importância ao elemento ético, como a ética e o altruísmo intergeracional através da prioridade dada ao Princípio da Precaução. Contudo, a conjuntura política aponta prevalência de medidas baseadas nas escolas dominantes do

pensamento econômico, normalmente ortodoxas, como a Economia Ambiental. Seja por indicar medidas práticas seja por concordar com a continuidade do modelo econômico atual, com pouca interferência nos mercados produtivos.

Os princípios da Economia Ambiental se opõem aos princípios da EcoEco ao considerar os mecanismos mercadológicos suficientes para solucionar a questão ambiental e alocar de forma eficiente e sustentável os recursos da natureza, com um olhar a curto e médio prazo. Em oposição, os economistas ecológicos consideram o estudo da escala ótima precedente ao estudo da alocação ótima, em um olhar a longo prazo (Andrade, 2008). O Quadro 1 resume as diferenças de enfoque entre as duas teorias analisadas:

Quadro 1: Diferenças de enfoque entre a Economia Ecológica e a Economia Ambiental

Economia Ecológica	Economia Ambiental
Escala ótima	Alocação ótima e externalidades
Prioridade à sustentabilidade	Prioridade à eficiência
Satisfação de necessidades básicas e distribuição equitativa	Bem-estar ótimo ou eficiência de Pareto
Desenvolvimento sustentável (global e Norte/Sul)	Crescimento sustentável em modelos abstratos
Pessimismo com relação ao crescimento e existência de escolhas difíceis	Otimismo com relação ao crescimento e existência de opções "win-win"
Coevolução imprevisível	Otimização determinística do bem-estar intertemporal
Foco no longo prazo	Foco no curto e médio prazos
Completa, integrativa e descritiva	Parcial, monodisciplinar e analítica
Concreta e específica	Abstrata e geral
Indicadores físicos e biológicos	Indicadores monetários
Análise sistêmica	Custos externos e valoração econômica
Avaliação multidimensional	Análise custo-benefício
Modelos integrados com relações de causa-efeito	Modelos aplicados de equilíbrio geral com custos externos
Racionalidade restrita dos indivíduos e incerteza	Maximização da utilidade e lucro
Comunidades locais	Mercado global e indivíduos isolados
Ética ambiental	Utilitarismo e funcionalismo

Fonte: Van den Bergh (2000).

O autor Jeroen van den Bergh (2000) cita a proximidade da Economia Ecológica com a Economia Evolucionária, que estuda relações de *path dependence* (dependência da trajetória), acidentes históricos e mudanças irreversíveis. “O conceito de coevolução é relevante aqui porque é considerado como um reflexo da influência mútua entre o sistema econômico e o ambiental, que cria um desenvolvimento histórico único” (Van den Bergh, 2000, p. 6).

A Economia Ambiental agregou ao debate ambiental ao introduzir diversas soluções aceitas pelos agentes políticos e econômicos, porém sua visão de desenvolvimento se manteve obsoleta em conjunto com a visão dos economistas clássicos, principalmente ao ressaltar o crescimento econômico da produção em si ao invés de vetores qualitativos do desenvolvimento econômico. Na contramão, a Economia Ecológica manifesta um olhar dinâmico de sustentabilidade forte com a abordagem multidimensional que a realidade ambiental, social e econômica requer.

Por exemplo, de acordo com o trabalho de Santana e Souza (2018), diversas críticas são tecidas sobre o mecanismo de compensação – MDL – proposto pela Economia Ambiental, primeiro está o fato de que a ação de compensar em si vai na contramão do objetivo de diminuir a quantidade de gás carbônico emitido na atmosfera. Ao invés de incentivar o uso de tecnologias limpas e mudanças produtivas, o mercado de carbono incentiva grandes poluidores a continuarem com suas emissões. Segundo, aprofunda-se a lógica capitalista de acúmulo de capital, mantendo o sistema econômico em desigualdade entre países desenvolvidos e periféricos em lógica desenvolvimentista não-sustentável também do ponto de vista social. Por fim, a questão ambiental fica à mercê de crises financeiras como a de 2008, que, na expectativa de perda financeira, a proteção ao meio ambiente retorna ao segundo plano. Este trabalho demonstra que o mecanismo não foi suficiente para atingir as metas de redução estabelecidas e apresenta falhas de mercado, como dupla contagem da mesma redução em dois países (Santana; Souza, 2018).

Em contrapartida, a crítica ambiental neoclássica sobre a teoria econômico-ecológica é em razão da relevância da lei da entropia na análise econômica da escassez de recursos. Mesmo considerando a existência da lei da entropia, não há de se aplicar sua lógica no campo econômico, pois este não se trata de um sistema isolado, e sim, de um sistema aberto. Assim, os mercados competitivos e os mecanismos de preços seriam suficientes para internalizar as externalidades ambientais. Mais adequado à análise seria o foco na lei da conservação, ao invés de uma má adaptação de um conceito emprestado da física (Mueller, 1998).

A seção seguinte contextualiza a situação do setor de saneamento básico no Brasil, sua importância para o desenvolvimento socioeconômico e faz um levantamento da legislação e políticas públicas que regem o setor.

4 SANEAMENTO NO BRASIL

As ações de saneamento são medidas para manter o meio ambiente em condições adequadas, de modo a proporcionar o bem-estar do ser humano e garantir mínimas perturbações à saúde (MDR, 2021). De acordo com a Lei 11.445 de 2007, estes serviços abrangem: o abastecimento de água potável, o esgotamento sanitário, a limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, a drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. Todos estes incluem o conjunto de atividades, instalações operacionais e infraestruturas necessárias para seu acesso (Brasil, 2007).

Apesar da importância e abrangência do setor, o Brasil apresenta um histórico de indefinição na titularidade da responsabilidade pelos serviços. Não existiu política nacional de saneamento até a década de 1950 e, no final da década de 1960, cerca de 17 organizações atuavam no mesmo setor, por exemplo: o Departamento de Obras de Saneamento (DMOS), a Fundação Serviços de Saúde Pública (FSESP), a Divisão de Engenharia Sanitária do Ministério da Saúde, entre outros. A política nacional começa a ser voltada para o saneamento com a criação do Planasa – Plano Nacional de Saneamento – durante a ditadura militar, mais especificamente no ano de 1971. Os serviços de água e esgoto passaram a ser prestados por autarquias e sociedades de economia mista com atuação, majoritariamente, estadual. Os recursos eram arrecadados junto do BNH – Banco Nacional de Habitação – e, então, do Sistema Financeiro de Saneamento, criado para centralizar os recursos e coordenar as ações desta política de desenvolvimento. Nesse período, os serviços eram prestados por meio de autarquias e sociedades de economia mista de atuação estadual, chamadas de Companhias Estaduais de Saneamento Básico (CESBs) (Medeiros, 2016).

O Planasa teve sucesso no avanço de cobertura de abastecimento de água, chegando a até 80% da população urbana no final de 1980. Entretanto, a cobertura de acesso ao esgotamento sanitário chegou somente a 32,4% no mesmo período. Desníveis regionais também se mostraram presentes, com acesso abaixo da média nacional para alguns estados (Jorge, 1992). Mesmo após a extinção do Plano em 1991, a estrutura de companhias estaduais permanece até a atualidade em alguns estados, como Santa Catarina e Paraná.

Economicamente, o setor de saneamento é configurado como um monopólio natural devido à exigência de altos investimentos, como o setor é intensivo em capital, aos elevados custos fixos e à inviabilidade da concorrência, como a duplicação de redes de água e esgoto não é eficaz (Galvão; Paganini, 2009; Madeira, 2010). O Quadro 2 indica as características físicas

e econômicas do setor de atendimento de água e esgoto. As características do setor indicam um serviço de utilidade pública, devido à sua essencialidade e externalidades. Portanto, a sua universalização, qualidade e equidade são fundamentais, sendo a regulação para sua eficiência e funcionalidade necessária para evitar falhas de mercado (Madeira, 2010).

Quadro 2: Características do setor de saneamento e suas repercussões

Características		Repercussões
Físicas	Maioria dos ativos (redes de água e esgoto) encontra-se enterrada	Difícil determinação do estado de conservação, custo de manutenção elevado e complexidade para detecção de vazamentos nas tubulações
	Mudança lenta no padrão tecnológico	Poucos ganhos de eficiência mediante avanços tecnológicos e ativos com vida útil prolongada
	Qualidade dos produtos de complexa verificação pelo usuário	Necessidade de estrutura adequada para monitoramento da qualidade de produtos e serviços ofertados pelas concessionárias
	Redes integradas em aglomerados urbanos	Envolvimento de mais de um ente federado na gestão dos serviços e expansão da infraestrutura associada ao planejamento urbano
	Essencialidade no uso e consumo dos produtos (água e esgoto)	Atendimento independente da capacidade de pagamento do usuário e geração de externalidades positivas e negativas para a saúde pública, meio ambiente, recursos hídricos, entre outros
Econômicas	Custo fixo elevado	Pouca flexibilidade para a periodização dos investimentos
	Ativos específicos e de longa maturação	Monopólio natural; inexistência de usos alternativos e baixo valor de revenda; possibilidade remota de saída das concessionárias do mercado (não contestável); e pouca atividade para investimentos
	Assimetria de informações	Demais atores do setor dependem da informação técnica e econômico-financeira disponibilizada pelas concessionárias
	Demanda inelástica	Possibilidade de extração de rendas significativas pelo prestador de serviços (monopólio)
	Economias de escala	Viabilidade da prestação dos serviços por uma única empresa (monopólio)
	Economias de escopo	Custos comuns na operação de serviços de água e esgoto e tratamento de esgotos, tornando mais viável a prestação dos serviços por uma única empresa

Fonte: Galvão e Paganini (2009).

O trabalho de Madeira (2010), indica que seriam necessários R\$ 250 bilhões para universalizar os serviços de saneamento, de 2003 a 2008. Porém, o investimento anual esteve entre R\$ 3,4 a R\$ 4,8 bilhões no período. Ou seja, há um subinvestimento atrelado às dificuldades do setor.

E não somente, pois a pesquisa de Sousa e Gomes (2019) demonstra que mesmo após o aporte de recursos disponibilizados para o setor pelo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), de cerca de R\$ 34 bilhões entre 2007 e 2018, irregularidades como projetos e orçamentos de baixa qualidade técnica, descumprimentos da documentação e dos prazos de execução em contrato mantiveram o nível de execução orçamentária em torno de 20% somente. Responsabilidade dos governos estaduais e municipais, seja de forma direta ou através de autarquias e empresas públicas, “o monitoramento das obras mostrou que elas realmente não saíam do papel: levavam, em média, dois anos para iniciar-se e depois, paralisavam ou atrasavam” (Sousa; Gomes, 2019, p. 40).

A partir de 2015, o orçamento autorizado para Saneamento Básico pelo PAC teve redução com a crise política e financeira que o país passou a enfrentar. Investimento que não foi retomado com o Plano Plurianual (PPA) do período seguinte, 2016-2019. Fato que desmobilizou e reduziu o volume de obras já abaixo do necessário e resulta no ainda baixo nível de atendimento de esgotamento sanitário e nos desníveis regionais. Ainda segundo os autores, a política para o setor não envolve transferências obrigatórias ou universais, nem piso mínimo de gastos exigidos, como existe com os setores da saúde e educação e os torna prioritizados (Sousa; Gomes, 2019).

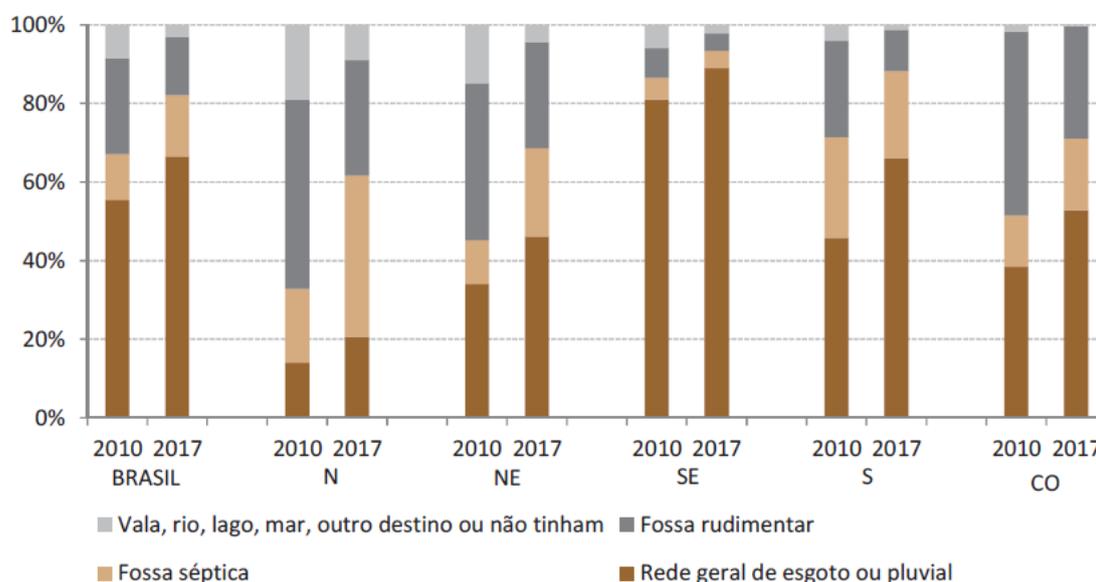
De acordo com o Plansab (Brasil, 2019a), enquanto a rede de canalização interna ou na propriedade de abastecimento de água chega a 85,7% e o atendimento via poço ou nascente com canalização interna é de 9,9%, apenas 2,1% dos brasileiros recebem atendimento via poço ou nascente sem canalização interna – solução considerada inadequada – e 2,3% recebem de outras formas. No caso da limpeza urbana e do manejo dos resíduos sólidos, 82,9% dos brasileiros recebem coleta direta dos resíduos domiciliares, 7,9% são atendidos por coleta indireta e os demais não recebem atendimento. Assim, são 9,2% de brasileiros com destinação final ambientalmente inadequada.

No caso do esgotamento sanitário, dados coletados em 2017 pelo Plansab (Brasil, 2019a) apresentam que 66,5% dos domicílios utilizam rede geral de esgoto ou pluvial e 15,6% utilizam a fossa séptica, considerada pelo Plansab (Brasil, 2019a) como solução adequada,

porém é um tratamento do tipo primário somente. Além disso, 14,9% utilizam a fossa rudimentar e 3% descartam em corpos receptores sem tratamento, ambas consideradas soluções inadequadas. Já de acordo com o Instituto Trata Brasil (2022), em pesquisa apresentada pelo PNAD, no ano de 2019 apenas 57,3% da população revelou ter acesso à rede coletora de esgoto. O que foi corroborado por dados do SNIS em 2020, com 55% da população com acesso aos serviços de coleta.

O recorte regional realizado pelo Plansab (Brasil, 2019a) do déficit para o esgotamento sanitário demonstra que a macrorregião Norte apresenta o maior percentual na precariedade do atendimento, com 38,3% de domicílios com soluções precárias, considerando a fossa séptica adequada. Ao não considerar a fossa séptica, o déficit aumenta, pois a região Norte possui o maior uso de fossa séptica com 41% dos domicílios. Já a macrorregião Nordeste apresenta o maior déficit em números absolutos, com 5,6 milhões de domicílios em situação precária de atendimento. A Figura 1 detalha as condições regionais com dados de 2010 e 2017.

Figura 1: Percentual de domicílios atendidos com esgotamento sanitário, por forma de afastamento, no País e nas macrorregiões, em 2010 e 2017.

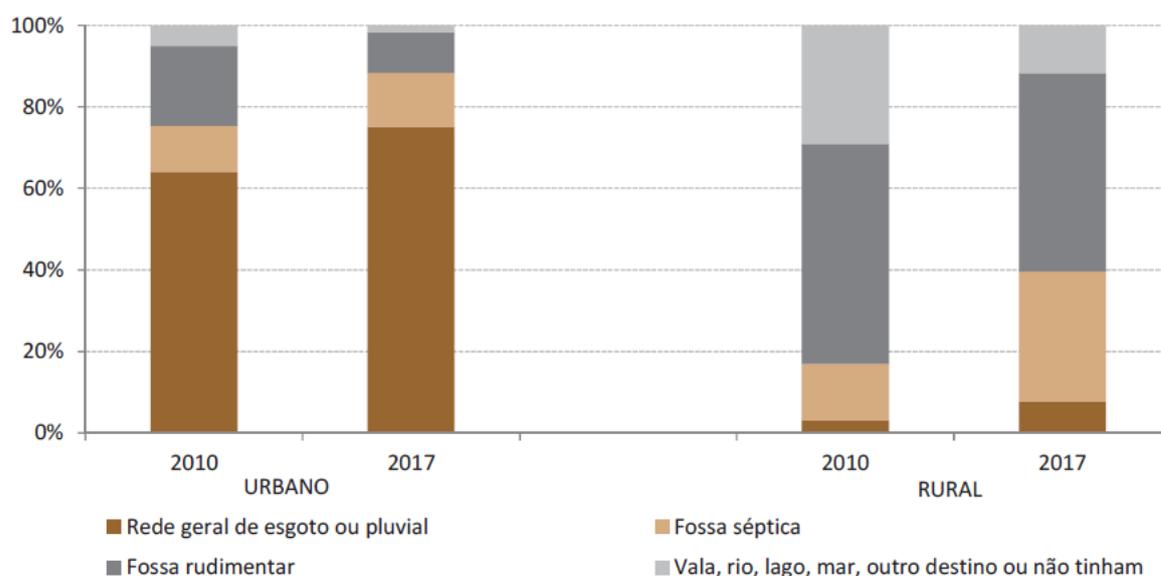


Fonte: Plansab (BRASIL, 2019a) com dados do Censo e da PNAD-Contínua.

Ainda de acordo com o Plansab (Brasil, 2019a), nas regiões urbanas o percentual de atendimento via rede geral chega a 75,2%, porém o déficit em termos absolutos alcança 7 milhões de domicílios. Este déficit se encontra, principalmente, em domicílios localizados em

locais periféricos das cidades (MDR, 2021). O maior déficit relativo se encontra nas regiões rurais, com 32% de atendimento via fossa séptica e um total de 60,3% via atendimento inadequado. É nestas regiões deficitárias que o atendimento via rede de esgotos geral está entre os menores níveis nacionais, como demonstra a Figura 2.

Figura 2: Percentual de domicílios atendidos com esgotamento sanitário, por forma de afastamento, nas áreas urbana e rural do País, em 2010 e 2017.



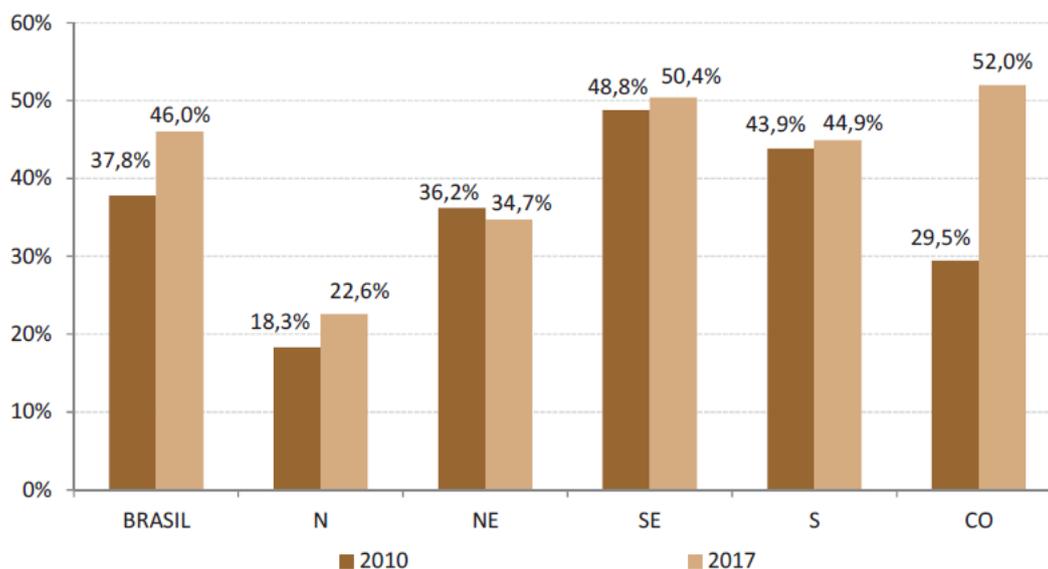
Fonte: Plansab (BRASIL, 2019a) com dados do Censo e da PNAD-Contínua.

Ao observar o nível de tratamento de todo o esgoto gerado, tem-se que 46% do esgoto, em média, é tratado no país. A macrorregião Centro-Oeste segue com o maior percentual, de 52%, e a macrorregião Norte com o menor percentual, de 22,6%. Como demonstra a Figura 3, no Nordeste houve redução do percentual no período analisado, o que demonstra que o alcance do tratamento de esgotos não acompanha o crescimento populacional da macrorregião.

Em recorte de faixa etária, raça autodeclarada e estrato de renda domiciliar *per capita*, o Instituto Trata Brasil (2022) afirma que a privação do acesso ao esgotamento sanitário no Brasil está mais presente entre a população jovem, autodeclarada parda e de baixa renda. Sobre a faixa etária: 23,9% estão entre 0 a 14 anos; 25% entre 15 a 29 anos; 38,8% entre 30 a 59 anos; e 12,3% com mais de 60 anos. Sobre a raça autodeclarada: 56,7% parda; 33,4% branca; 9,1% preta; 0,4% amarela; e 0,4% indígena. Sobre a renda domiciliar *per capita*: 44,9% recebem até ½ salário mínimo; 27,9% recebem mais de ½ salário mínimo; 39,3% recebem mais de 1 até 2

salários mínimos; 4,9% recebem mais de 2 até 3 salários mínimos; e 4,1% recebem mais de 3 salários mínimos.

Figura 3: Índice de tratamento dos esgotos gerados no País e nas macrorregiões, em 2010 e 2017.



Fonte: Plansab (BRASIL, 2019a) com dados do Censo e da PNAD-Contínua.

O Panorama do Saneamento Básico no Brasil (MDR, 2021) explica que o ideal é a coleta das águas residuárias por sistema de esgotamento sanitário e transporte para local onde será feito o tratamento adequado antes do lançamento dos efluentes em corpos receptores. Para tal finalidade existem dois tipos de sistemas: o coletivo e o individual. No primeiro, os resíduos são afastados das residências para tratamento em grandes estações e, no segundo, é aplicada solução individual no local. O sistema coletivo é classificado em relação à separação ou não da rede de esgotos com a rede pluvial. No Brasil, utiliza-se o sistema separador-absoluto, onde as águas de esgoto são separadas totalmente das águas da chuva.

O sistema separador absoluto apresenta suas vantagens por fornecer uma menor vazão de efluentes, como menores custos e melhoras no tratamento, porém sua desvantagem é que as águas da drenagem pluvial não são tratadas – o que pode oferecer risco de poluição aos corpos hídricos receptores.

Na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) existem algumas etapas de tratamento: o tratamento preliminar, com gradeamento para retirada de sólidos grosseiros e areia; o tratamento primário, onde são retirados flutuantes, sedimentáveis e materiais particulados; o

tratamento secundário, para retirada da matéria orgânica via processos biológicos que podem ser em meio anaeróbio ou aeróbio (com organismos que não dependem ou dependem de oxigênio); e o tratamento terciário, que remove poluentes mais específicos como o nitrogênio e fósforo. Dependendo do caso, os corpos receptores podem receber efluentes com tratamento de nível secundário ou terciário (MDR, 2021).

O tratamento precarizado no Brasil tem diversas causas, e além de algumas já citadas, o Ministério do Desenvolvimento Regional destaca:

Algumas das possíveis causas para esse cenário na prestação dos serviços de esgotamento sanitário no país é a descontinuidade de políticas públicas nos diferentes governos, a falta de planejamento, a ineficiência na gestão dos prestadores de serviços, a carência de recursos financeiros (governos federal, estaduais e municipais), a fiscalização frágil, o setor de regulação incipiente, a existência de ligações factíveis, dentre outros. (MDR, 2021, p. 88).

As ligações factíveis são aquelas que estão disponíveis e acessíveis para conexão à rede de esgotos, porém, os consumidores optaram pela não ligação ou conexão, seja pela declividade do terreno do domicílio, pelo descrédito no serviço, por desconhecimento ou até por temor de inadimplência devido aos valores cobrados (MDR, 2021). Nesses casos, a importância do saneamento básico deve ser ressaltada e o setor público deve proporcionar: conhecimento sobre os serviços de saneamento, soluções econômicas para consumidores sem capacidade de pagamento e até auxílio técnico para o alcance da universalização.

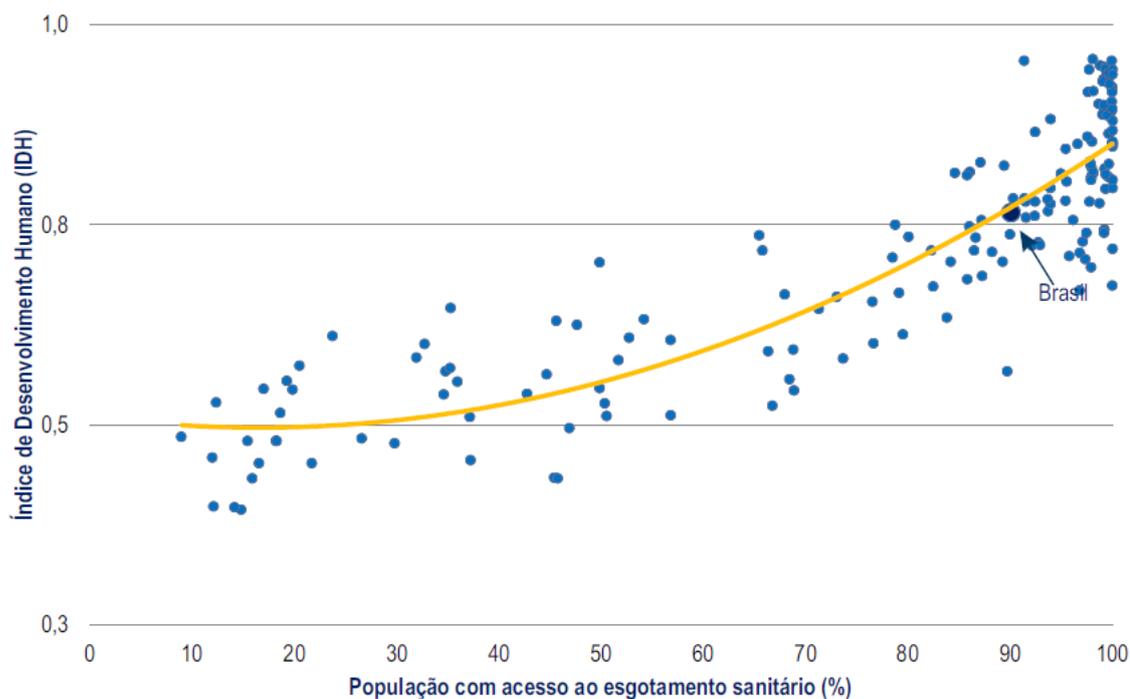
No que se refere à importância do setor, a subseção seguinte apresenta as características e relações embasadas em estudos e dados estatísticos que denotam a importância do saneamento básico para o desenvolvimento econômico e social da nação.

4.1 A IMPORTÂNCIA DO SETOR PARA O DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL

A privação dos serviços de saneamento afeta os indicadores de saúde e rendimento nacionais (Instituto Trata Brasil, 2022). O documento “Benefícios econômicos e sociais da expansão do saneamento no Brasil” publicado pelo Instituto Trata Brasil em 2022 indica que países com maiores níveis da população com acesso ao esgotamento sanitário apresentam menores taxas de mortalidade infantil e aumento da longevidade da população. O acesso às ações do setor está relacionado com um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) elevado –

que envolve indicadores de saúde, expectativa de vida, renda e educação – como demonstra o Gráfico 3 a seguir:

Gráfico 3: Saneamento e Desenvolvimento Humano, 2019



Fonte: Instituto Trata Brasil (2022) com dados de UNICEF e WHO, 2021 e UNDP, 2021. (*) O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) varia de 0 a 1, e quanto mais próximo de 1 mais desenvolvido é o país.

Elaboração: Ex Ante Consultoria Econômica.

No que se refere aos rendimentos, os investimentos e operações em saneamento impulsionam os empregos e a renda da economia nacional de forma direta, indireta e induzida. As obras do setor contratam diretamente trabalhadores e construtoras, que indiretamente contratam fornecedores e terceiros. A forma induzida é através do consumo gerado pela renda do trabalho, que impulsiona diversas atividades econômicas. Estes efeitos ainda podem ser locais ou dispersos no território nacional. Assim, investimentos de R\$ 12,57 bilhões, já corrigidos da inflação, na média do período entre 2005 e 2020 geraram por ano uma média de 163,8 mil empregos e R\$ 19,713 bilhões de renda na economia brasileira. O que significa que a cada R\$ 1,00 investido houve geração em torno de R\$ 1,57 de renda, ou efeito multiplicador. As operações de saneamento obtiveram uma média de R\$ 57,453 bilhões por ano em receitas

operacionais no mesmo período e geraram uma média por ano de 401.591 empregos e R\$ 86,796 bilhões de renda.

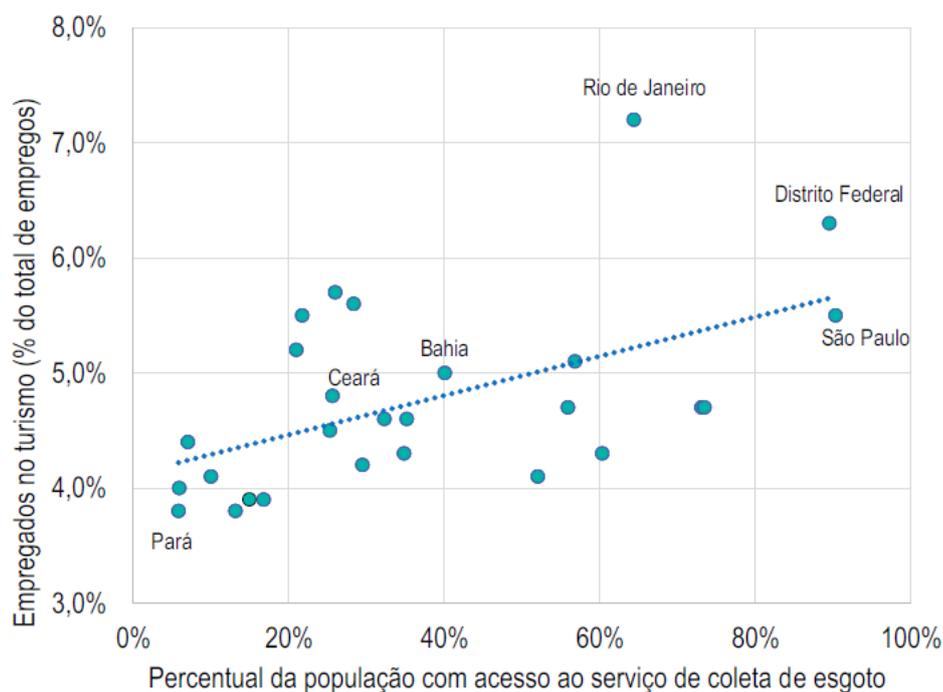
Outro meio de expansão de rendimentos nacionais é a arrecadação de impostos e contribuições sobre a produção, a renda e a propriedade. A estimativa é de R\$ 9,419 bilhões por ano na média do período da pesquisa do Instituto Trata Brasil (2022), que envolve ICMS, IPI, Imposto sobre Importação, IPTU, IPVA, IR, FGTS e outros.

Na área da saúde, a falta de atendimento de água tratada e esgoto coletado e tratado está relacionado com infecções gastrointestinais, doenças transmitidas por mosquitos, parasitas e até doenças respiratórias, com o contágio reduzido devido à pouca higiene das mãos. Tais enfermidades provocam o afastamento dos trabalhadores de suas funções laborais e dos estudantes de suas escolas. Os custos para a sociedade aparecem através de maiores gastos com saúde pública e privada, de horas não-trabalhadas, da diminuição da produtividade do trabalho e impactos na educação, na carreira profissional e na renda familiar.

Em 2019, dados da Pesquisa Nacional de Saúde indicaram que 41% dos afastamentos foram relacionados às doenças de veiculação hídrica e um total de 92,13 milhões de afastamentos por doenças respiratórias. Os dados sobre a remuneração média mensal do trabalho da PNAD Contínua de 2019 indicaram que os moradores de domicílios sem acesso ao saneamento básico obtiveram renda 83% menor do que os moradores com acesso integral aos serviços de saneamento. Em consideração aos trabalhadores com as mesmas condições de empregabilidade (educação, experiência e outros), os trabalhadores sem acesso a esgotamento sanitário apresentaram salários 4,9% menores, em média.

Os dados relacionados ao rendimento escolar da PNAD Contínua de 2019 constataam também que crianças e adolescentes sem atendimento de serviços de esgotamento sanitário apresentam, em média, um atraso escolar 3,2% acima daqueles que possuem atendimento. Nesse caso, o atraso escolar é considerado como o nível de escolaridade efetiva e o número de anos escolares possíveis em sua idade escolar (Instituto Trata Brasil, 2022).

Outra relação econômica com as ações de saneamento é a valorização imobiliária. Dados da PNAD Contínua de 2017 revelam que os imóveis com diferença apenas na conexão à rede geral de esgotos apresentaram valores 3,2% acima daqueles não conectados. Não somente, o turismo é influenciado pelos impactos ambientais do saneamento. Áreas degradadas não atraem turistas e os municípios podem perder empregos e negócios potenciais (Instituto Trata Brasil, 2022). O Gráfico 4 demonstra essa relação a seguir:

Gráfico 4: Participação do turismo no emprego e saneamento básico, 2019

Fonte: Instituto Trata Brasil (2022) com dados do IBGE.

Elaboração: Ex Ante Consultoria Econômica.

A indústria e a agricultura também são afetadas, com o uso da água e do despejo de seus resíduos em corpos hídricos receptores assim como os processos produtivos em geral³. Logo, os benefícios do alcance da universalização do saneamento são imensos. A estimativa de investimentos necessários para o Brasil chegar à universalização entre o período de 2021 até 2040 é calculada em torno de R\$ 639 bilhões pelo Instituto Trata Brasil (2022). Os benefícios referentes aos investimentos retornariam no montante estimado de R\$ 1,455 trilhão.

Como a legislação brasileira fornece o embasamento legal, e as políticas públicas existentes são instrumentos para atingir a universalização, a subseção seguinte elenca as leis e normas que legislam sobre o setor de saneamento e as políticas vigentes que o alcançam.

³ A água consumida em todo o processo produtivo dos bens e commodities é o conceito de água virtual (UNIFESP, 2023).

4.2 LEGISLAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS SOBRE O SETOR

A Constituição Federal (Brasil, 1988) assegura como direitos sociais em seu artigo 6: a saúde, a educação, o trabalho, a moradia, a segurança, a proteção à maternidade e à infância, além da assistência aos desamparados e outros. Em seu artigo 21, inciso XX, estabelece que compete à União “instituir diretrizes para o desenvolvimento urbano, inclusive habitação, saneamento básico e transportes urbano”. Em seu artigo 23, inciso IX, estabelece como competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios “promover programas de construção de moradias e a melhoria das condições habitacionais e de saneamento básico”. Compete, da mesma forma, ao Sistema Único de Saúde “participar da formulação da política e da execução das ações de saneamento básico”, artigo 200 e inciso IV.

Sendo assim, a Lei nº 8.080 de 1990 dispõe sobre o Sistema Único de Saúde (SUS) e reforça a saúde como direito fundamental e, como determinantes de tal direito, elementos como o saneamento básico, o meio ambiente, a renda, o acesso aos bens e serviços essenciais. Logo, as ações, serviços públicos e conveniados que integram o SUS devem obedecer ao princípio de integração da saúde, meio ambiente e saneamento básico em nível executivo, como cita o artigo 7 e inciso X.

A Política Nacional de Saneamento Básico em si foi formulada através da Lei nº 11.445 de 2007. Em seu artigo 2, a referida lei define que os serviços públicos de saneamento serão prestados com bases em princípios fundamentais, sendo alguns deles:

I - universalização do acesso e efetiva prestação do serviço;

II - integralidade, compreendida como o conjunto de atividades e componentes de cada um dos diversos serviços de saneamento que propicie à população o acesso a eles em conformidade com suas necessidades e maximize a eficácia das ações e dos resultados;

III - abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos realizados de forma adequada à saúde pública, à conservação dos recursos naturais e à proteção do meio ambiente;

IV - disponibilidade, nas áreas urbanas, de serviços de drenagem e manejo das águas pluviais, tratamento, limpeza e fiscalização preventiva das redes, adequados à saúde pública, à proteção do meio ambiente e à segurança da vida e do patrimônio público e privado;

V - adoção de métodos, técnicas e processos que considerem as peculiaridades locais e regionais;

VI - articulação com as políticas de desenvolvimento urbano e regional, de habitação, de combate à pobreza e de sua erradicação, de proteção ambiental, de promoção da saúde, de recursos hídricos e outras de interesse social relevante, destinadas à melhoria da qualidade de vida, para as quais o saneamento básico seja fator determinante;

VII - eficiência e sustentabilidade econômica.

Para a sustentabilidade econômica, o principal fator de financiamento dos serviços deve ser a cobrança direta dos usuários. Esta deve seguir uma estrutura tarifária que considere: as categorias de usuários; as faixas ou quantidades crescentes de consumo; a quantidade mínima de consumo; o custo mínimo necessário para disponibilização do serviço em quantidade e qualidade adequadas; e a capacidade de pagamento dos consumidores. Outras fontes de financiamento são os subsídios públicos e privados; as inversões diretas de capitais públicos, seja de autarquias ou de empresas; os empréstimos de fundos, de bancos públicos ou privados; os investimentos de capitais próprios de responsáveis pelos serviços; fundos de recursos hídricos e compensações ambientais; e fundos especiais para universalização dos serviços (Peixoto, 2013).

No caso da gestão dos recursos hídricos, a Lei 9.433 de 1997 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, também conhecida como Lei das Águas, afirma o domínio público da água ao mesmo tempo que a define como recurso limitado e dotado de valor econômico. Além disso, afirma o uso prioritário para consumo humano e animal em casos de escassez e assegura para as gerações atual e futura a disponibilidade de água com qualidade adequada para uso. Em seu artigo 12, deixa sujeita a outorga pelo Poder Público os diversos tipos de usos, entre eles o “lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final” (Brasil, 1997). E em seu artigo 21, vincula à fixação de valores de cobrança a observação, nos lançamentos de esgotos: do volume lançado, sua variação, características físico-químicas, biológicas e de toxicidade do afluente.

As políticas de saneamento devem, da mesma forma, estar alinhadas com a Lei 12.305 de 2010, que regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dispõe sobre as classificações, princípios, disposições gerais e de planejamento. O planejamento em torno do

setor do saneamento abrange o Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), os planos estaduais e os Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB).

Outro instrumento de planejamento de políticas públicas é o Plano Plurianual (PPA), realizado em períodos de quatro anos. O PPA organiza objetivos, metas e diretrizes da administração pública e é constituído por programas, cada programa apresenta um conjunto de ações orçamentárias e projetos que auxiliam na execução dos objetivos. Uma divergência entre a Lei 11.445 e os planejamentos governamentais é o fato dos planejamentos agruparem os serviços de água e esgoto, além de separá-los do manejo de resíduos sólidos e de águas pluviais – ao contrário do tratamento integrado que afirma a Lei (Brasil, 2019a).

Diversas instituições governamentais atuam para implementar os objetivos de avanços no setor, como é o caso do Ministério das Cidades, Ministério do Meio Ambiente, Agência Nacional das Águas, Ministério da Saúde e Fundação Nacional de Saúde ou Funasa. A Funasa é responsável pelo atendimento aos municípios com até 50 mil habitantes, de áreas rurais, quilombolas e aquelas sujeitas a endemias (Brasil, 2019a). Através do Programa Nacional de Saneamento Rural, visado pelo Plansab, a Funasa apresenta os *Wetlands* Construídos como umas das indicações da matriz tecnológica para soluções individuais e para soluções coletivas de esgotamento sanitário (Brasil, 2019b).

Além do programa citado, o Plano Nacional visa outros dois programas: o Programa Saneamento Estruturante e o Programa de Saneamento Básico Integrado, que são tratados junto aos objetivos do programa de saneamento do PPA. O Plano Nacional busca, também, alinhar suas metas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, principalmente com os objetivos 3, saúde e bem-estar, e 6, água potável e saneamento: ambos visam alcançar até 2030 o acesso para todos à água, saneamento e higiene. Outros objetivos visados são 7, energia limpa e acessível; 11, cidades e comunidades sustentáveis; 12, consumo e produção responsáveis; 13, ação contra a mudança global e do clima; e 17, parceria e meios de implementação.

Sobre a legislação brasileira, as demais normas são aplicáveis: o Estatuto das Cidades; o Código de Defesa do Consumidor; o Decreto nº 5.440 de 2005 que regulamenta sobre a qualidade da água para abastecimento; a Portaria nº 2.914/2011, sobre procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo; a Lei de Licitações Públicas; Lei de Concessões e Permissões de Serviços Públicos; e a Lei de Concessões Especiais em Regime de

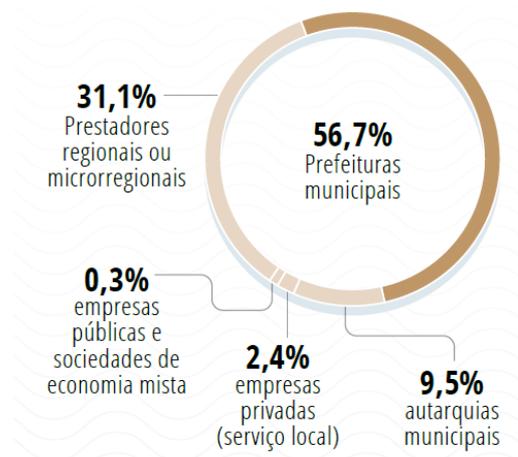
Parceria Público-Privada. Além das Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (Peixoto, 2013):

- Resoluções nº 357/2005 e 397/2008: classificam corpos d'água e estabelecem padrões de lançamento de efluentes no meio ambiente;
- Resolução nº 377/2006: sobre licenciamento ambiental de sistemas de esgotamento;
- Resolução nº 396/2008: sobre enquadramento das águas subterrâneas.

Há, ainda, o Decreto Estadual nº 14.657 de 2009 que regula as condições de lançamento e padrões de efluentes e a Resolução nº 430 do CONAMA de 2011, que complementa a Resolução nº 357 e especifica em seu artigo 27 o monitoramento pela responsável poluidora do efluente lançado e do corpo receptor (Medeiros, 2016). No caso das concessionárias prestadoras de serviços de saneamento, o artigo 241 da Constituição Federal (1988) afirma que a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios disciplinarão os consórcios por meio de lei; e a Lei nº 11.107 de 2005 dispõe sobre a contratação de consórcios públicos.

Em relação à natureza jurídica dos prestadores de serviço de esgotamento sanitário no Brasil, a maioria dos municípios é atendida pelas prefeituras. De acordo com o Ministério do Desenvolvimento Regional (2021), tal fato é devido à maioria dos municípios que utilizam soluções alternativas ser atendida pelas prefeituras. A Figura 4, a seguir, demonstra a distribuição dos prestadores:

Figura 4: Prestadores por natureza jurídica



Fonte: Ministério do Desenvolvimento Regional (2021).

A Lei 11.445 já está atualizada de acordo com a Lei 14.026, considerada o novo Marco Legal do Saneamento Básico. Aprovada em 15 de julho de 2020, a nova lei atribui a competência para edição de normas de referência sobre o setor à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), veda a prestação dos serviços via contrato de programa e pretende aprimorar as condições estruturais do setor no país. O novo marco ainda define o ano de 2033 como meta para universalização, considerando 99% do atendimento de água potável e 90% do atendimento de esgotamento sanitário (Brasil, 2020).

Segundo a pesquisa de Silva (2022), a meta proposta pela lei é considerada um desafio perante as dificuldades do setor – que envolve infraestrutura, contratações complexas e alto aporte de ativos. O novo marco também incentiva a entrada de empresas privadas, com o objetivo de trazer novos investimentos para o setor, ao vedar a prestação via contrato de programa e visar a contratação por concessão mediante prévia licitação. Entretanto, “a experiência mundial também demonstra que os aportes privados são limitados, em especial nas áreas mais carentes e com menor perspectiva de retorno de capital” (Silva, 2022). O que acaba por depender de financiamento público, no caso do Brasil, através do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e Caixa Econômica Federal.

Não necessariamente a estrutura de gestão é sinônimo de qualidade no setor. O trabalho de Scriptore (2010) analisou a performance de diversas estruturas no país, seja pública ou privada, seja local ou regional. Como os agentes não atuam de forma homogênea, o estudo não encontrou padrão suficiente para indicar um melhor arranjo para o alcance da universalização. Os problemas do setor estão relacionados com o nível de governança, e a garantia do direito ao saneamento só pode ser efetivada com eficiente regulação (Silva, 2022). Assim, os efeitos da lei esperam a atuação da ANA e a implementação das normas de referência, agora em sua competência.

De acordo com Oliveira (2017), a nova lei pode trazer risco para o equilíbrio econômico-financeiro das empresas estaduais que resulta de economias de escala. Com a saída de grandes municípios pela privatização, o mecanismo de subsídio cruzado – utilizado para financiar o atendimento aos pequenos municípios e a parcela da população sem condições de pagar pelo serviço – fica prejudicado. Só seria possível reequilibrar financeiramente através do aumento tarifário ou com subsídio direto de fonte fiscal.

Por outro lado, ao determinar a prestação do atendimento regionalizado através do inciso XIV do artigo 2, a lei favorece a economia de escala, a universalização, a viabilidade

técnica e econômico-financeira – seja para a gestão pública ou privada. Outra importante definição é sobre a titularidade dos serviços, agora pertencente de forma nítida aos Municípios e ao Distrito Federal, nos casos locais, e aos Estados, no caso de interesse comum.

Por fim, a transição às novas exigências contratuais para as empresas estatais é considerada brusca e há a possibilidade de tais empresas não conseguirem implementar as mudanças requeridas, correndo risco de descontinuidade na prestação dos serviços, de queda na qualidade e até de rescisões (Silva, 2022).

5 OS SISTEMAS *WETLANDS* CONSTRUÍDOS

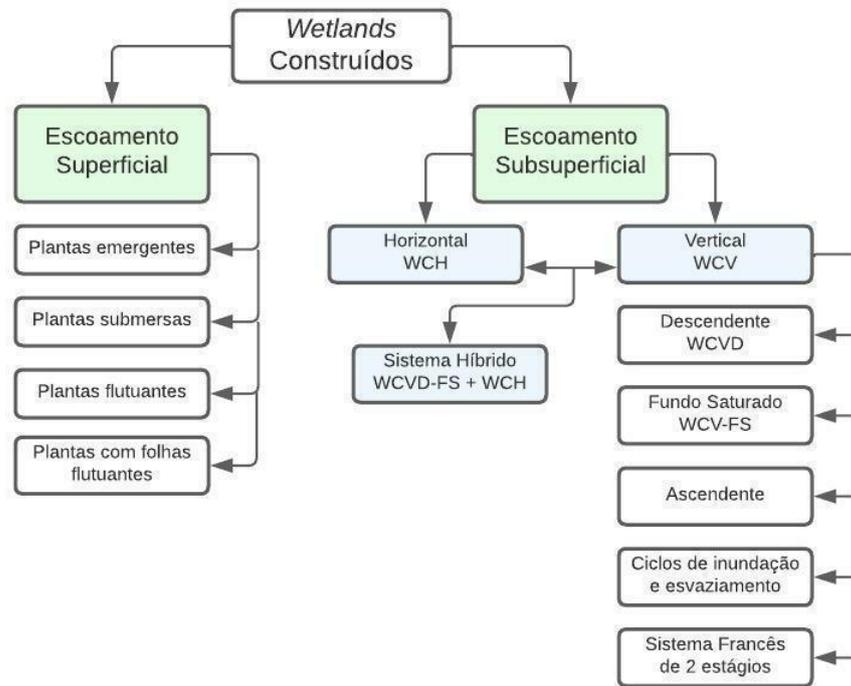
De acordo com Barreto (2016), *Wetlands* Construídos é um sistema de tratamento de águas residuárias sustentável, pois utiliza da capacidade de depuração de plantas e microorganismos ao reproduzir um ecossistema do tipo pântano e, por ser biologicamente diverso, pode ser utilizado para o tratamento de diferentes tipos de efluentes.

Apesar de sua complexidade biológica, o sistema é tecnicamente simples de construir e operar, não requer o uso de produtos químicos, apresenta baixos custos e necessidades energéticas, pois remove os poluentes com uma combinação de processos naturais “incluindo sedimentação, precipitação, adsorção, assimilação por tecidos vegetais e transformações microbiológicas” (Barreto, 2016, p. 5). Conhecido também por outras expressões como “sistemas alagados construídos” (SAC), “filtros com macrófitas”, “terras úmidas construídas”, “leitões cultivados”, “sistema de zonas de raízes”, “jardins filtrantes” e outros (Von Sperling; Sezerino, 2018), este sistema maximiza os processos químicos, físicos e biológicos presentes na natureza. Desenvolvido inicialmente pelo cientista Käthe Seidel, do instituto Max Planck, para remover fenol e diminuir a carga orgânica de efluente de laticínio na Alemanha em 1950 (Cunha; Severiano Junior, 2018), começou a ser difundido no hemisfério ocidental durante os anos 70 e de forma mais acelerada mundialmente após 1985 (Kadlec; Wallace, 2009).

Segundo Sezerino *et al* (2015), as primeiras experiências brasileiras com a nova tecnologia se iniciaram em 1980 com os pesquisadores Salati e Rodrigues, porém, foi somente após os anos 1990 que as pesquisas no âmbito acadêmico se ampliaram entre variados modelos, configurações e áreas.

Estes modelos são classificados, primeiramente, de acordo com o escoamento do esgoto afluente. São dois grandes grupos: de escoamento superficial, onde o esgoto afluente fica exposto à atmosfera, e de escoamento subsuperficial, onde não ocorre o contato do afluente com a atmosfera. Os *wetlands* de escoamento superficial são mais parecidos com o ecossistema natural e são divididos de acordo com as macrófitas utilizadas para cada projeto, como mostra a Figura 5. Os sistemas de escoamento subsuperficial são divididos entre escoamento horizontal, vertical ou híbrido. Dentre os *Wetlands* Construídos de escoamento subsuperficial vertical existem os modelos ascendentes, descendentes, com ciclos de inundação e esvaziamento, de fundo saturado e o sistema francês (Sezerino; Silva, 2021).

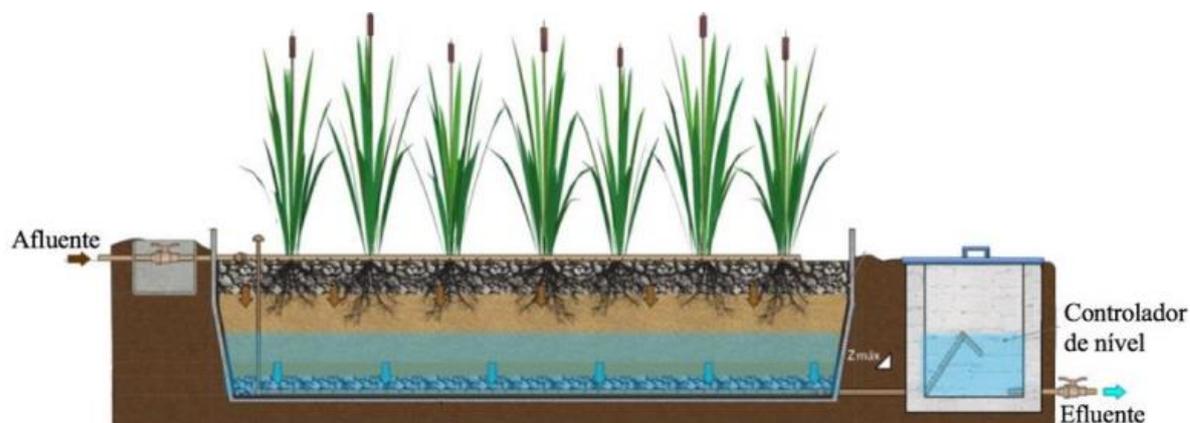
Figura 5: Classificação dos *wetlands* construídos



Fonte: Adaptado de Sezerino e Silva, 2021.

Para os projetos de escoamento horizontal e vertical, no que se refere ao tratamento de esgotos domésticos de sistemas de pequeno porte, é pressuposto o tratamento prévio do afluente, por exemplo com tanque séptico. O sistema francês, ao contrário, é composto por dois estágios e aceita o recebimento de esgoto bruto após gradeamento – remoção de sólidos por meio de grades (Von Sperling; Sezerino, 2018). No modelo vertical com o fundo saturado ou WCV-FS, o projeto opera com uma fração do perfil vertical convencional e outra fração saturada, em razão da presença do ajuste hidráulico que permite a manutenção do nível de saturação líquida. Esta característica permite um tratamento secundário avançado, com remoção significativa do nitrogênio total, pois cria condições aeróbias próximas à superfície e condições anóxicas ao fundo (Sezerino; Silva, 2021). A Figura 6 representa o sistema de escoamento vertical com fundo saturado como foi descrito, abaixo.

Figura 6: *Wetland* Construído de fluxo vertical com fundo saturado (WCV-FS)



Fonte: Acervo GESAD - www.gesad.ufsc.br.

Outro modelo citado por pesquisadores é o sistema multiestágio, que combina estágios de escoamento superficial e de escoamento subsuperficial. O trabalho de Milani *et al* (2020), por exemplo, estuda um sistema *Wetlands* Construído multiestágio para tratamento de efluentes de vinícola, onde a configuração demonstrou níveis de qualidade compatíveis com os requeridos pela legislação italiana, região da pesquisa. Não somente, os resultados sugerem o reuso dos efluentes finais do tratamento com o sistema natural em irrigação para agricultura. Além de ser opção viável para irrigação, os efluentes finais do tratamento podem ser reutilizados para fertilização agrícola, como indica o artigo de Dias *et al.* (2020) realizado em Portugal. O tratamento foi eficaz o suficiente para demonstrar altos níveis de remoção de metais, matéria orgânica, amônia e outros poluentes de águas residuárias de uma fazenda de porcos, mesmo que ainda mantendo nutrientes para fertilização.

A tecnologia é, então, presente em vários países e utilizada para muitas finalidades desde somente o tratamento de esgoto municipal até o reuso com o abastecimento de água potável para consumo. Grandes estações de tratamento como a *Tar Creek* em Oklahoma, Estados Unidos, com uma área de 20.000 m² para processar efluentes de águas de drenagem ácida de mineração; o *Clayton County Constructed Wetlands* na Georgia, Estados Unidos, com vazão capaz de tratar efluentes domésticos de mais de 400.000 habitantes com objetivo de potabilizar a água; a *Changshu Industrial Park Tertiary Treatment Wetland* na China, com tratamento a nível terciário de efluentes industriais para reuso e controle da poluição em lago local; e a *Henningfield Sludge Treatment Reed Bed System* na Inglaterra, capaz de atender uma população de 1,5 milhão a 2 milhões de habitantes (*Wetlands Construídos Ltda.*, 2020a).

Em localidades com a agricultura como atividade econômica principal de parcela significativa dos habitantes, o reuso da água para irrigação se torna destaque na agenda ambiental. É o caso da Turquia, onde 75% do consumo é voltado para a agricultura e a reutilização de forma segura só pode acontecer após o efluente tratado corresponder aos parâmetros legais, como na maioria dos países (Cakmak; Apaydin, 2010). O que explica a motivação dos estudos que envolvem os níveis de remoção de poluentes da tecnologia, pois caso não ocorra de forma eficiente, a saúde dos habitantes corre risco com doenças parasitárias e contaminações diversas, e o excesso de nutrientes orgânicos pode se acumular no solo causando eutrofização, crescimento excessivo de algas e poluição (Tuttolomondo *et al*, 2020).

O trabalho de Cakmak e Apaydin (2010) indica o uso da tecnologia, principalmente, para países em desenvolvimento, seja como tratamento complementar ou não. O estudo também afirma que a eficiência do sistema aumenta quando em conjunto com outros tipos de tratamento, como a lagoa de estabilização. Entretanto, as desvantagens estão na taxa de operação lenta em comparação com outros tratamentos convencionais e na dependência da aplicação de métodos eficientes de *Wetlands* Construídos para alcance de níveis de qualidade requeridos legalmente, o que pode afetar o custo do sistema. Apesar de não existir um modelo único considerado mais eficiente, pois o tratamento e as plantas utilizadas dependem e se alteram com as características locais. A manutenção é outro fator considerável, que depende dos proprietários rurais, se não feita de forma adequada pode diminuir a qualidade do tratamento para irrigação. Como há a importância do sistema para o reuso de águas residuais e o controle da poluição de corpos hídricos, relaciona-se a relevância da tecnologia para com a gestão de recursos hídricos e seus impactos econômicos. Desta forma, em alguns casos, “os custos e responsabilidades devem ser divididos entre produtores, instituições governamentais e agricultores” (Cakmak; Apaydin, 2010, p. 198).

A publicação de Tenenbaum (2004) cita como exemplo o tipo de sistema *restorer* usado para tratar efluente residual de minas, por ser mais complexo que os *Wetlands* Construídos convencionais. O exemplo demonstra o poder de depuração da ecotecnologia, seus diferentes modelos e sua imprevisibilidade, já que é uma imitação de um ecossistema natural e depende do clima, solo, plantas e micro-organismos. Deste modo, quanto maior é o tamanho do sistema, maior é sua capacidade de depuração. E quanto maior é o tempo para depuração, melhores resultados são apresentados, pois há mais tempo de ação de micróbios. Apesar da técnica ser utilizada normalmente em lugares que não podem pagar por tratamentos

convencionais e caros, nem sempre é tão barata devido a custos com modificações no terreno para inclusão do sistema. Mesmo assim, Ceballos, Oliveira, Meira, Konig, Guimarães e Souza (2001) confirmam que, pela simplicidade do design, de operação e de manutenção, a tecnologia se apresenta atualmente como a mais promissora para ser aplicada em países em desenvolvimento.

Outra pesquisa que enfatiza o uso em países em desenvolvimento é a realizada por Ali *et al.* (2018). O estudo feito no Paquistão analisou o nível de eficiência de um modelo híbrido com *Wetland* Construído de escoamento subsuperficial e fluxo vertical em conjunto com cinco lagoas de fitotratamento conectadas em série. Plantas aquáticas foram usadas para tratamento de esgoto municipal e o uso para irrigação foi avaliado. O resultado demonstrou que o tratamento com modelo híbrido foi capaz de corresponder aos padrões para irrigação e é, assim, recomendado para reuso em produções agrícolas. O risco ambiental do uso de águas residuais na irrigação seria, sobretudo, associado ao acúmulo de metais pesados no solo. Nesse caso, o sistema híbrido apresentou maior porcentagem de redução de poluentes do que o uso individual do modelo de fluxo vertical ou das lagoas de fitotratamento. Os autores afirmaram que os *Wetlands* Construídos apresentam boa relação custo-benefício, são de fácil operação e uma alternativa promissora para atender déficits na demanda por irrigação de países áridos, por exemplo (Ali *et al.*, 2018).

Para entregar todas essas características e apresentar um pleno funcionamento, um sistema WC necessita de componentes fundamentais em seu design. Estes são especificados na subseção seguinte, o que também conduz a uma maior compreensão do funcionamento da tecnologia.

5.1 COMPONENTES FUNDAMENTAIS DOS *WETLANDS* CONSTRUÍDOS

Os diversos componentes utilizados para a instalação e funcionamento de um sistema de tratamento *Wetland* Construído seguem elencados entre: material suporte, macrófitas aquáticas e micro-organismos. Como estes elementos caracterizam e definem a eficiência do sistema, serão também discutidos abaixo.

5.1.1 Material Suporte

O material suporte, também chamado de material filtrante ou substrato, é aquele com a função de dar suporte para as plantas e de filtrar a retenção de sólidos suspensos no efluente (Benassi *et al.*, 2018). Não somente, serve como meio de aderência para os micro-organismos responsáveis pela depuração do esgoto junto das plantas, ou seja, está relacionado com os mecanismos físico-químicos do tratamento (Monteiro, 2014; Rousso, 2017).

Os tipos de materiais de suporte mais utilizados no Brasil para *wetlands* de fluxo horizontal, de acordo com o trabalho de Sezerino *et al.* (2015) são brita, areia, escória de aciaria, argila, cascas de arroz, pneu picado, bambu, pedras de mão, pedrisco, cascalho e outros. A relação destes materiais com a capacidade de tratamento do sistema se dá através do tempo de detenção, da disponibilidade de oxigênio e das superfícies de contato entre os micro-organismos e a água residuária (Monteiro, 2014).

A escolha deste material filtrante está relacionada com a finalidade do tratamento, então as condições do material escolhido devem ser conhecidas, como a granulometria – dimensão das partículas – porosidade, permeabilidade e capacidade de adsorção. Estes ditarão a condutividade hidráulica do material, ou a capacidade de fluxo e escoamento ao longo do tempo, e a possibilidade de colmatção do leito, problema de entupimento dos poros comum neste tipo de sistema (Benassi *et al.*, 2018; Monteiro, 2014; Cunha; Severiano Junior, 2018; Rousso, 2017).

5.1.2 Macrófitas Aquáticas

As macrófitas aquáticas que habitam os *wetlands* ou pântanos são grandes plantas que compõem a maioria dos ecossistemas aquáticos, desde água doce à água salobra, e demonstram alta capacidade de adaptação e grande amplitude ecológica – o que possibilita colonizar diversos tipos de ambientes (Esteves, 1998). Como exemplos podem ser citadas plantas aquáticas vasculares, musgos aquáticos e grandes algas (Brix, 1997).

Segundo o Manual de Sistemas de *Wetlands* Construídos para o Tratamento de Esgotos Sanitários (Benassi *et al.*, 2018), as plantas comumente utilizadas no Brasil são *Phragmites australis* (caniço-de-água), *Typha spp.* (taboa); *Eleocharis spp.* e *Juncus spp.* (junco); *Cyperus papyrus spp.* (papiro-brasileiro); *Eichhornia crassipes* (jacinto-d'água, aguapé, baronesa,

rainha-dos-lagos); *Pistia stratiotes* (alface-d'água) e *Salvinia* (samambaia-aquática, erva-de-sapo, marrequinha, murerê). Essas macrófitas são normalmente classificadas entre emergentes, flutuantes ou submersas na água.

Da mesma forma que ocorre com o material suporte, a escolha das macrófitas para o sistema de tratamento se baseia em alguns fatores que são, segundo Benassi *et al.* (2018): (a) os principais poluentes que se deseja remover; (b) o tipo de *Wetland* Construído a ser utilizado; (c) as condições climáticas e a adaptabilidade da planta; (d) a disponibilidade da espécie na localidade de implantação; (e) as características físico-químicas do efluente a ser tratado.

De forma resumida, Sezerino *et al.* (2015) explica:

A escolha da macrófita está relacionada à tolerância da planta quanto a ambientes saturados de água e/ou esgoto, seu potencial de crescimento e a presença dessas plantas nas áreas onde o sistema de tratamento será implantado, pois assim as macrófitas estarão adaptadas às condições climáticas locais. (Sezerino *et al.*, 2015, p.155).

A relação destas plantas com o tratamento de efluentes via *wetlands* é descrita no artigo de Brix (1997), onde é exposto que os efeitos mais importantes nesse processo são os efeitos físicos, como o controle da erosão, a filtração e a promoção de superfície para adesão de microorganismos. Este último caracteriza o biofilme, uma importante camada criada nas superfícies disponíveis das plantas e no material suporte. O biofilme é formado por uma comunidade de microrganismos que amplificam a digestão do esgoto a ser tratado. Outras funções primordiais das macrófitas aquáticas:

- Liberação de oxigênio e outros gases na rizosfera, região do solo onde as raízes se desenvolvem, favorecendo processos de degradação aeróbia e transformação de nutrientes (Brix, 1997; Sezerino, 2002);

- Inserção das raízes no meio suporte, promovendo boas condições para filtração (Sezerino *et al.*, 2015);

- Aproveitamento da biomassa (Abreu, 2019) para consumo ou venda, neste caso somente de espécies com valor econômico como o papiro, outras plantas ornamentais ou comestíveis.

Mas não somente, as macrófitas adicionam valor ao local promovendo *habitat* para a vida selvagem e transformando as estações de tratamento em belos jardins filtrantes, esteticamente agradáveis.

5.1.3 Micro-organismos

Os micro-organismos ou a microbiota presente nos sistemas *Wetlands* Construídos são uma grande variedade de fungos, bactérias, protozoários e micrometazoários que se desenvolvem aderidos ao biofilme, já citado. Sua contribuição para o tratamento de efluentes é através da degradação aeróbia ou anaeróbia da matéria orgânica e da transformação de nutrientes que em excesso recorrem riscos à saúde, como o nitrogênio (Rizzon, 2020; Benassi *et al.*, 2018; Appel, 2019).

Matos e Matos (2018) afirmam que, para um melhor desempenho destes micro-organismos, o meio de adesão para o biofilme deve ser mantido em grande disponibilidade. Este meio é composto não somente pelas raízes das plantas, como por rizomas (estrutura do caule) e colmos (caule composto por nós).

Os mecanismos de remoção dos poluentes presentes no efluente inicial podem ser resumidos no Quadro 3:

Quadro 3: Mecanismos de remoção de poluentes dos *Wetlands* Construídos

Componentes do Esgoto	Mecanismos de Remoção
Sólidos Suspensos	-Sedimentação -Filtração
Compostos Orgânicos Solúveis	-Degradação microbiana aeróbia -Degradação microbiana anaeróbia
Nitrogênio	-Amonificação seguida de nitrificação -Assimilação pelas plantas -Desnitrificação -Adsorção -Volatilização de amônia
Fósforo	-Absorção e Adsorção -Assimilação pelas plantas
Metais	-Adsorção e troca catiônica -Complexação -Precipitação -Assimilação pelas plantas

	-Oxidação/redução microbiana
Patogênicos	-Sedimentação -Filtração -Morte natural -Predação

Fonte: Adaptado de Monteiro (2014) *apud* Cooper *et al.* (1996).

Outra característica importante dos sistemas alagados construídos é o dimensionamento do sistema, ou a área projetada, que segue descrita na subseção seguinte pois impacta nos custos de instalação e operação.

5.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Uma característica essencial que impacta nos custos de instalação durante um projeto de sistema alagados construídos é o dimensionamento do sistema. Embora existam diversas maneiras de calcular as dimensões de um sistema de tratamento, o documento de título “Dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil” (Von Sperling; Sezerino, 2018) apresenta um consenso entre pesquisadores e praticantes acerca do dimensionamento de três principais tipos de *Wetlands* Construídos: de escoamento horizontal subsuperficial (recebendo esgoto pré-tratado), de escoamento vertical (recebendo esgoto pré-tratado) e sistema francês (recebendo esgoto bruto). O documento abrange somente esgoto doméstico e sistemas de tratamento coletivos de pequeno porte.

Os principais cálculos do processo determinam a área superficial requerida, o número de unidades em paralelo, as dimensões das unidades e uma estimativa das concentrações de efluentes. Neste trabalho, o foco será o cálculo de área superficial requerida para simplificar uma possível comparação entre outras referências na literatura. Assim, Von Sperling e Sezerino (2018) apontam duas abordagens diferentes para o cálculo de área superficial requerida. Primeiro, calcula-se a carga de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) do esgoto bruto preferencialmente pela fórmula:

$$\text{Carga de DBO do esgoto bruto } \left(\frac{g}{d} \right) = \text{Carga per capita } \left(\frac{g}{\text{hab. d}} \right) \times \text{População (hab)}$$

Utiliza-se este valor para calcular a carga de DBO afluente à etapa de *Wetlands* Construídos:

$$\begin{aligned} \text{Carga de DBO afluente aos wetlands } \left(\frac{g}{d}\right) \\ = \text{Carga de DBO do esgoto bruto } \left(\frac{g}{d}\right) \times \left[1 - \frac{\text{Eficiência de remoção do tratamento prévio (\%)}}{100}\right] \end{aligned}$$

E, então, obtém-se a área superficial requerida através de um valor adotado para a taxa de aplicação orgânica superficial:

$$\text{Área superficial requerida (m}^2\text{)}: \frac{\text{Carga de DBO afluente aos wetlands } \left(\frac{gDBO}{d}\right)}{\text{Taxa de aplicação orgânica superficial } \left(\frac{gDBO}{m^2 \cdot d}\right)}$$

Para finalizar a primeira abordagem, verifica-se o valor da taxa de aplicação hidráulica superficial resultante:

$$\begin{aligned} \text{Taxa de aplicação hidráulica superficial resultante } \left(\frac{m^3}{m^2 \cdot d}\right) = \\ = \frac{\text{Vazão média afluente aos wetlands } \left(\frac{m^3}{d}\right)}{\text{Área superficial requerida (m}^2\text{)}} \end{aligned}$$

Caso a taxa de aplicação hidráulica superficial resultante se encontrar dentro da faixa usual, a área superficial requerida calculada é adotada. Caso a taxa de aplicação hidráulica esteja acima dos valores típicos, a área requerida pode ser aumentada até a taxa de aplicação hidráulica se tornar adequada. Já na segunda abordagem, utilizam-se os dois critérios abaixo:

Critério da taxa de aplicação orgânica superficial:

$$\text{Área superficial requerida (m}^2\text{)} = \frac{\text{Carga de DBO afluente aos wetlands } \left(\frac{gDBO}{d}\right)}{\text{Taxa de aplicação orgânica superficial } \left(\frac{gDBO}{m^2 \cdot d}\right)}$$

Critério da taxa de aplicação hidráulica superficial:

$$\text{Área superficial requerida (m}^2\text{)} = \frac{\text{Vazão média afluyente aos wetlands (}\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\text{)}}{\text{Taxa de aplicação hidráulica superficial (}\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}\text{)}}$$

Considerando ambos os critérios de mesma importância, adota-se o maior valor. Assim é possível cumprir tanto com o critério da taxa de aplicação orgânica superficial quanto com o critério da taxa de aplicação hidráulica superficial.

Outra forma de calcular a área superficial requerida é descrita didaticamente no Manual de Sistemas de *Wetlands* Construídos para o Tratamento de Esgotos Sanitários (Benassi *et al.*, 2018). O processo se aplica aos diversos tipos do sistema e se resume na equação geral:

$$A_s = \frac{Q_{méd} \cdot \ln\left(\frac{C_a}{C_e}\right)}{K_T \cdot h \cdot p}$$

Onde:

A_s : Área superficial do leito (m^2)

$Q_{méd}$: Vazão média através do leito (m^3/d)

C_a : Concentração do poluente no afluyente - concentração de entrada (mg/L)

C_e : Concentração do poluente no efluyente - concentração de saída (mg/L)

K_T : Coeficiente de decaimento do poluente (d^{-1})

h : Altura do nível do esgoto (m)

p : Porosidade do leito (%)

Além do trabalho fornecer todos os passos e valores de coeficientes necessários para aplicação dos cálculos, informa também que o comprimento deve ser maior que a largura do leito, estes determinados após o cálculo da área superficial. Neste método também é possível calcular o Tempo de Detenção Hidráulica através da equação:

$$TDH = \frac{l \cdot c \cdot h \cdot p}{Q_{méd}}$$

Onde:

TDH: Tempo de detenção hidráulica (d)

l: Largura do leito (m)

c: Comprimento do leito (m)

h: Altura do nível do esgoto (m)

p: Porosidade do leito, em número decimal

$Q_{\text{méd}}$: Vazão média através do leito (m^3/d)

Não somente, o TDH é uma medida que impacta na eficiência do tratamento e testes de acordo com os níveis de remoção de poluentes desejados são recomendados. Normalmente, a remoção apenas de matéria orgânica e sólidos é compatível com TDH menor em relação à remoção efetiva de nutrientes (Benassi *et al.*, 2018).

De acordo com a empresa projetista *Wetlands Construídos Ltda.* (2020b), apesar das dimensões diferirem conforme os critérios de cada projeto, há uma estimativa de que são necessários de 1 a 2 m^2 por habitante, considerando 160 litros diários de vazão como média de produção de esgoto de 1 habitante.

Antes de analisar a tecnologia WC à luz das abordagens teóricas, faz-se necessário abordar as demais características, como os custos que abrangem a implantação e a operação da tecnologia, quais elementos os compõem, como estes estão conectados à custo-efetividade e sua comparação com soluções convencionais.

6 CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO

Apesar de uma proporção da literatura afirmar que a tecnologia WC requer baixos custos (Benassi *et al.*, 2018; Meira, 2004; Andrade, 2012; Zinato; Guimarães, 2017; Cakmak; Apaydin, 2010) e que é custo-efetiva (Ali, 2018), as pesquisas que estudam especificamente os custos de implantação e operação indicam altos custos de implantação (CAPEX) e menores custos de operação (OPEX) quando o sistema WC é comparado com as tecnologias de tratamento convencionais.

Os custos são divididos entre: custos de implantação ou construção abreviados como CAPEX, do inglês ‘*capital expenditure*’ ou despesas de capital; e custos de operação e manutenção abreviados como OPEX, de ‘*operational expenditure*’ ou despesas operacionais. Na pesquisa de Schroeder *et al.* (2022), uma avaliação comparativa entre os *Wetlands* Construídos e os sistemas de tratamento descentralizado normatizados pela norma ABNT NBR 13969/1997, os custos CAPEX foram calculados através do dimensionamento dos sistemas, do levantamento de materiais, equipamentos, maquinários e serviços utilizados na implantação. Na mesma pesquisa, os custos OPEX foram calculados através de despesas com energia, remoção do lodo produzido, operador para o sistema e conserto de equipamentos.

O trabalho de Schroeder *et al.* (2022) não leva somente os custos em consideração, considera a eficiência de tratamento dos sistemas também, tudo em um cenário de 150 habitantes e vida útil de 15 anos para possibilitar a comparação entre as tecnologias. Para isso, utilizou de dados secundários da norma ABNT NBR 13969/1997, da literatura, das estações de tratamento com *Wetlands* do Grupo de Estudos em Saneamento Descentralizado (GESAD) e empresas prestadoras de serviço de operação de estações descentralizadas foram consultadas. O Quadro 4 representa os resultados dos valores para CAPEX e OPEX, compostos com base no Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) do mês de julho de 2019 e orçamentos diretos com fornecedores de materiais e empresas prestadoras do serviço:

Quadro 4: CAPEX e OPEX para as tecnologias estudadas para o equivalente populacional de 150 pessoas, para a realidade de mercado brasileiro e sob um horizonte de projeto de 15 anos*

	Itens para levantamento do custo	WCH	WCV	SH	FAN	LAB
CAPEX	Materiais	38.841,15	39.794,27	62.801,70	7.185,60	12.380,37
	Equipamentos	-	6.944,46	6.944,46	-	18.309,28
	Maquinários	5.165,06	4.621,37	7.356,00	603,14	983,92
	Serviços	4.842,85	14.130,71	17.325,66	4.304,03	18.676,64
	CAPEX TOTAL	48.849,06	65.490,81	94.427,82	12.092,77	50.350,21
	CAPEX por habitante	325,66	436,61	629,52	80,62	335,67
OPEX (Anual)	Gasto energético	-	113,58	113,58	-	3.360,24
	Remoção de lodo	-	-	-	2.000,00	5.040,00
	Operador para sistema	1.112,16	2.224,32	2.224,32	-	8.897,28
	Conserto de equipamento	-	173,61	173,61	-	457,73
	OPEX TOTAL	1.112,16	2.511,51	2.511,51	2.000,00	17.755,25
	OPEX por habitante	7,41	16,74	16,74	13,33	118,37

*WCH: Wetlands Construídos de Fluxo Horizontal; WCV: Wetlands Construídos de Fluxo Vertical; SH: Sistema Híbrido; FAN: Filtro Anaeróbio; LAB: Lodo Ativado por Batelada.

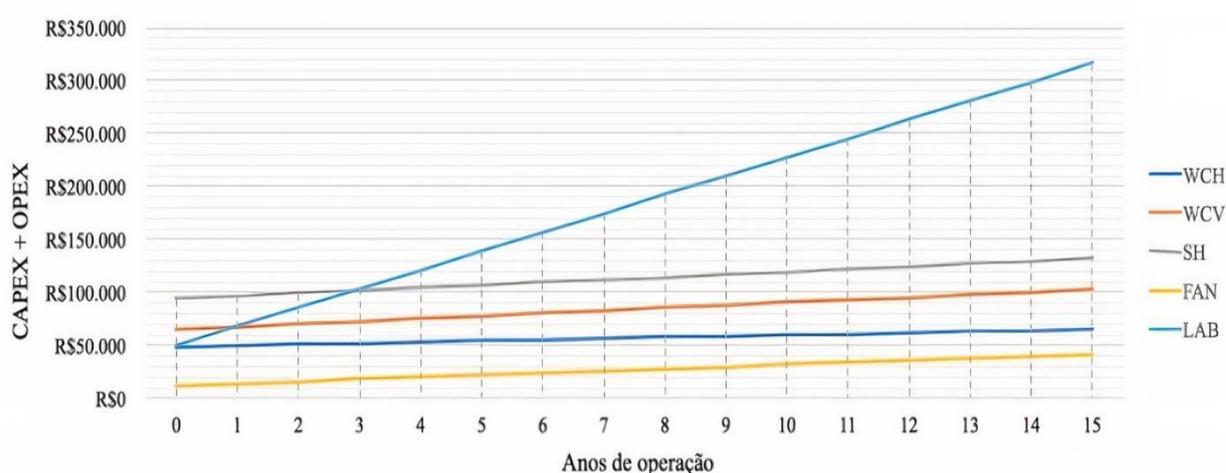
Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados presentes em Schroeder *et al.* (2022).

De acordo com Schroeder *et al.* (2022), o Sistema Híbrido (WC de combinação do fluxo vertical com fluxo horizontal) e o sistema *Wetlands* Construídos de Fluxo Vertical (WCV) apresentaram custos elevados de CAPEX, enquanto os *Wetlands* Construídos de Fluxo Horizontal (WCH) apresentaram CAPEX semelhante ao sistema de Lodos Ativados por Batelada (LAB). Este alto valor de implantação para os *Wetlands* Construídos é atrelado, destaca a autora, à necessidade de grande área requerida para construção (mais de 24 vezes acima da área requerida para os sistemas de Filtro Anaeróbio (FAN) e LAB), e à grande quantidade de materiais necessários. Principalmente sobre o Sistema Híbrido, que requer duas unidades de tratamento com WC e, conseqüentemente, requer maior área. Da mesma forma afirma a publicação de Tenenbaum (2004), nem sempre os *Wetlands* Construídos são a alternativa menos custosa, sobretudo devido aos grandes gastos com terraplanagem.

As maiores vantagens do sistema WC estão no reduzido custo operacional e de manutenção, na elevada eficiência para remoção de poluentes – principal destaque para o sistema WCV e SH – e na não geração de lodo. Ainda em relação ao desempenho, o sistema de tanque séptico com FAN não demonstrou elevados níveis de eficiência no tratamento – apesar do reduzido CAPEX e OPEX, diferente das outras tecnologias com destaque para os sistemas

de LAB, além das WC já citadas (Schroeder *et al.*, 2022). A publicação de Boratto *et al.* (2021) complementa que os processos anaeróbios geram metano (CH₄), gás de efeito estufa mais danoso se comparado ao gás carbônico, através da degradação anaeróbia de matéria orgânica, e confirma a sustentabilidade ambiental presente nos sistemas WC com uma menor emissão de metano e aliada da alta redução nos custos operacionais. Segue abaixo o Gráfico 5:

Gráfico 5: Valores de CAPEX + OPEX para as tecnologias estudadas e empregadas no tratamento de esgoto de um equivalente populacional de 150 pessoas, sob horizonte de projeto de 15 anos*



*WCH: *Wetlands* Construídos de Fluxo Horizontal; WCV: *Wetlands* Construídos de Fluxo Vertical; SH: Sistema Híbrido; FAN: Filtro Anaeróbio; LAB: Lodo Ativado por Batelada.

Fonte: Schroeder *et al.*, 2022, p. 72.

Como demonstra o Gráfico 5, após o terceiro ano de operações os valores de CAPEX e OPEX para o sistema LAB superam os valores para o Sistema Híbrido e passa a ser a tecnologia com maiores custos totais. A principal vantagem do sistema LAB está na alta qualidade de tratamento em pouca área superficial requerida, o que o torna mais adequado para áreas urbanas. Sobre os custos OPEX, o sistema WCH apresentou os menores valores, além de ser a tecnologia com menor CAPEX entre os *wetlands*. Finalmente, conclui a autora:

(...) os WC são sistemas interessantes para o tratamento descentralizado em áreas rurais e periurbanas isoladas, onde disponibilidade por área não é uma limitação e a operação e a manutenção complexas, que exigem mão de obra ou serviço especializado, apresentam-se como uma dificuldade. Já o LAB é ideal para áreas urbanas, sobretudo em razão do bom desempenho de tratamento proporcionado em área superficial reduzida. Caso a área não seja uma limitação, e os padrões de lançamento sejam restritivos, o WCV e SH também são opções adequadas para essas localidades, tendo como principal vantagem sobre o LAB a não geração de lodo e o

menor requisito de energia. Por fim, o FAN é uma tecnologia apropriada quando não existem padrões rigorosos para o tratamento, em áreas rurais por apresentarem baixo custo operacional ou áreas urbanas por requererem pequena área superficial. (Schroeder *et al.*, 2022, p. 76)

Ou seja, os *Wetlands* Construídos são indicados como tratamento descentralizado em áreas rurais e periurbanas isoladas e em localidades sem limitações de área, ao contrário do sistema LAB, esse indicado para áreas mais urbanizadas, e o FAN, indicado quando não há padrões rigorosos e há necessidade de um sistema de baixo custo. Tais características indicam a tecnologia WC como possível solução para o acesso ao esgotamento sanitário na área rural brasileira, que apresenta o maior déficit relativo do país no total de 60,3% de atendimento inadequado. Ainda, quando o objetivo é o reúso dos efluentes tratados, o Sistema Híbrido se mostrou como melhor opção devido ao alto desempenho na remoção de poluentes (Schroeder *et al.*, 2022).

Outra pesquisa específica sobre custos de sistemas de esgoto é a de Von Sperling e Salazar (2013), em que elencam os custos de capital para sistemas convencionais de tratamento no Brasil. Os resultados, em que os custos são divididos entre a) sistema de coleta, b) sistema de transporte e c) sistema de tratamento, demonstraram que em todos os casos estudados o sistema de coleta apresentou ser o mais custoso, entre 53% e 64% do custo total. O tratamento mais barato foi o UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – e o de maior custo foi o tratamento via Lodos Ativados. Além disso, o pós-tratamento através de lagoas de estabilização aumenta o custo total entre US\$ 100 a US\$170 por habitante (valores com base no INCC/FGV de Abril de 2010 e taxa de conversão de R\$1,00 = US\$0,59). Nos casos dos sistemas de tratamento naturais, como uma maior área deve ser requerida, fica provável a necessidade de maiores distâncias para o transporte até o local adequado. Deste modo, os autores afirmam que para pequenas cidades de pouca população é mais vantajoso o tratamento de esgoto em locais próximos da coleta. Já para cidades grandes e populosas, o sistema de transporte para longas distâncias até locais apropriados para sistemas de tratamento mais econômicos pode ser mais vantajoso (Von Sperling; Salazar, 2013), o que valida novamente os resultados da pesquisa de Schroeder *et al.* (2022).

Perondi, Wolff, Decezaro e Araújo (2020) realizaram uma análise comparativa do custo de ciclo de vida (CCV) para três cenários de *Wetlands* Construídos para tratamento de esgoto doméstico. O primeiro é um projeto de estação de tratamento de esgoto experimental presente na Universidade Federal de Santa Maria, composto por tanque séptico e *Wetlands*

Construídos de Fluxo Vertical com recirculação ao tanque séptico. O segundo cenário é fictício e composto pelo mesmo sistema do cenário experimental, apenas com mudanças nas características para redução de custos. O último cenário, também fictício, é composto por Sistema Híbrido. O custo de vida foi, então, calculado para o valor total de implantação, operação, manutenção e desativação utilizando valores de produtividade presentes nas Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos, na tabela SINAPI e em empresas especializadas.

Para os custos de manutenção foram consideradas as substituições das bombas centrífugas, necessárias a cada 5 anos como prevenção, a poda das macrófitas e a remoção de espécies invasoras, mediante contratação de serviço de jardinagem. Para os custos de desativação foram considerados a coleta e o transporte do resíduo via caminhão basculante, e a disposição do material em aterro industrial. A análise do custo do ciclo de vida (ACCV) é feita pelas autoras através do método do valor presente líquido (VPL), onde é calculada a atratividade dos investimentos via soma dos valores presentes a partir de uma dada taxa e seu período de duração. Com data-base no ano de 2019 e taxa de juros sendo o IGP-M, o resultado do somatório das despesas e do VPL para os três cenários com efluente equivalente a 10 pessoas, com contribuição de 150 L pessoa⁻¹ d⁻¹, e tempo de vida útil de 20 anos segue resumido na Quadro 5:

Quadro 5: Resumo do custo do ciclo de vida das ETE's dos cenários estudados*

Custos do Ciclo de Vida (i=6,2% a.a.)	ETE cenário 1 (R\$)	ETE cenário 2 (R\$)	ETE cenário 3 (R\$)
Custos totais de implantação	25.661,23	17.974,93	13.064,10
Custos totais de operação	2.209,63	2.209,63	1.104,81
Custos totais de manutenção	49.092,09	51.224,10	31.229,65
Custos totais de desativação	8.849,00	8.849,00	11.025,90
Custo total	85.811,95	80.257,66	56.424,46
Análise do custo do ciclo de vida (Valor Presente Líquido - VPL)			
	53.315,15	44.524,63	32.438,30

*Os valores são negativos, pois se trata do investimento total do ciclo de vida dos sistemas e não há retorno monetário, somente saídas de capital.

Fonte: Perondi, Wolff, Decezaro e Araújo (2020).

O estudo leva em consideração que o desempenho dos demais cenários é semelhante ao cenário 1. Assim sendo, devem ser levadas em consideração as especificidades do projeto para o cenário 1, da ETE experimental. Durante a implantação do sistema de tratamento, a área

foi cedida pela universidade, não necessitando a compra, mas foram necessários o licenciamento ambiental e o projeto executivo. As autoras relatam:

Na implantação o desnível do terreno onde está localizada a ETE experimental não permitiu que o módulo do wetland construído fosse escavado no solo. Assim, foi necessário construir o filtro em alvenaria acima do nível do solo. Para garantir que não ocorressem infiltrações, foi feita uma impermeabilização de maior custo, com manta asfáltica, ao invés de utilizar lona. (Perondi; Wolff; Decezaró; Araújo, 2020, p. 180)

Com a dificuldade pelo desnível do terreno, os custos de implantação são maiores na ETE experimental, pois houve a necessidade tanto da construção de filtro em alvenaria como de utilização de manta asfáltica para a impermeabilização – o que encarece a implantação. Além disso, foi utilizada no cenário 1 a planta ornamental *Heliconia psittacorum* ou Helicônia-papagaio, mais um fator de acréscimo aos custos CAPEX do projeto – apesar da espécie permitir a venda posterior e recuperação de parte da renda. Assim, para o segundo cenário os custos de implantação são reduzidos em cerca de 30% com a possibilidade de escavação no solo, impermeabilização com lona plástica, uso de plantas disponíveis nas proximidades locais e emprego de mão-de-obra local no estilo “mutirão”. Com a utilização da macrófita local *Canna indica* no cenário 2, os custos de manutenção são maiores devido à necessidade mais frequente de poda que requer a espécie, o que torna o CCV da ETE 2 apenas 17% inferior (Perondi; Wolff; Decezaró; Araújo, 2020).

Já o terceiro cenário apresentou o menor CAPEX, principalmente em consideração aos equipamentos, material hidráulico e elétrico de menor custo de aquisição. Assim, mesmo com área requerida superior para o SH, o custo de implantação total é o menor entre os cenários e o CVV da mesma forma, com 39% de redução em relação à ETE 1 e 27% em relação à ETE 2 devido aos baixos custos de operação e manutenção do projeto. O estudo conclui que a não adição de produtos químicos resulta em custos operacionais reduzidos e que os custos dos projetos são relativos, não há um padrão para o sistema que depende de diversas variáveis e permite uma gama grande de configurações de projeto (Perondi; Wolff; Decezaró; Araújo, 2020).

A tecnologia incipiente exprime diversas outras vantagens e desvantagens, não somente relativas aos custos, e relacionadas também à não padronização e presença de diversas configurações e designs de projetos. A seção seguinte aborda estas características elencadas na literatura.

7 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS SISTEMAS WETLANDS CONSTRUÍDOS

De modo geral, a tecnologia *Wetlands* Construídos apresenta diversas vantagens e desvantagens mencionadas na literatura. Algumas vantagens comumente mencionadas são: a alta performance na remoção de poluentes e eficiência no tratamento, quando bem projetado e operado, a não geração de biossólidos ou lodo, os baixos custos, a proteção ao meio ambiente, a baixa demanda energética e o potencial para reuso de água. Já algumas desvantagens citadas são: a alta área requerida para implantação, o entupimento de materiais filtrantes (colmatção), as variações na performance apresentadas pelos diferentes projetos de design, a proliferação de mosquitos e vetores causada pelo sistema de fluxo superficial e os altos custos CAPEX. O Quadro 6 apresenta um resumo de vantagens citadas na literatura revisada pela autora:

Quadro 6: Vantagens dos Sistemas *Wetlands* Construídos

Vantagens	Referências
Quando bem projetado e operado apresenta alta performance na remoção de poluentes e eficiência no tratamento de águas residuárias	(Temel; Avcı; Ardali, 2018); (Cakmak; Apaydin, 2010); (Kaushal; Wani; Patil; Datta, 2016); (Omotade; Alatise; Olanrewaju, 2019); (Mariano, 2017); (Comissão Europeia, 2019); (Abreu, 2019); (Rizzon, 2020); (Schroeder <i>et al.</i> , 2022); (Boratto <i>et al.</i> , 2021); (Oral <i>et al.</i> , 2020)
A performance não é afetada de forma significativa por condições climáticas	(Temel; Avcı; Ardali, 2018)
Não gera resíduos biossólidos ou lodo	(Temel; Avcı; Ardali, 2018); (Comissão Europeia, 2019); (Schroeder <i>et al.</i> , 2022); (Boratto <i>et al.</i> , 2021)
Os de fluxo subsuperficial não causam proliferação de mosquitos \ vetores	(Temel; Avcı; Ardali, 2018)
Economicamente viável \ Baixos custos	(Temel; Avcı; Ardali, 2018); (Benassi <i>et al.</i> , 2018); (Cakmak; Apaydin, 2010); (Ali <i>et al.</i> , 2018); (Omotade; Alatise; Olanrewaju, 2019); (Mariano, 2017); (Abreu, 2019); (Schroeder <i>et al.</i> , 2022); (Boratto <i>et al.</i> , 2021)
Protege o meio ambiente	(Temel; Avcı; Ardali, 2018); (Omotade; Alatise; Olanrewaju, 2019); (Mariano, 2017); (Comissão Europeia, 2019); (Leal, 2019)

Boa opção para pequenas comunidades ou comunidades rurais	(Temel; Avcı; Ardalı, 2018); (Cakmak; Apaydin, 2010)
Conveniente como tratamento secundário ou terciário	(Temel; Avcı; Ardalı, 2018)
Baixa demanda energética	(Benassi <i>et al.</i> , 2018); (Salviato, 2013); (Comissão Europeia, 2019); (Schroeder <i>et al.</i> , 2022); (Boratto <i>et al.</i> , 2021)
Tolerância para flutuações na vazão de entrada	(Benassi <i>et al.</i> , 2018); (Mariano, 2017); (Lemos, 2016); (Abreu, 2019)
Paisagismo	(Benassi <i>et al.</i> , 2018); (Mariano, 2017); (Comissão Europeia, 2019)
Potencial de reuso da água	(Benassi <i>et al.</i> , 2018); (Ali <i>et al.</i> , 2018); (Castorina <i>et al.</i> , 2015); (Oral <i>et al.</i> , 2020)
Reciclagem de nutrientes	(Benassi <i>et al.</i> , 2018)
Ausência de vibração e ruídos	(Benassi <i>et al.</i> , 2018)
Tendência a minimizar maus odores	(Benassi <i>et al.</i> , 2018)
Atendem aos requisitos da legislação nos padrões de emissão	(Benassi <i>et al.</i> , 2018)
Conveniente como tratamento final de grandes sistemas municipais	(Cakmak; Apaydin, 2010)
Fácil manutenção e operação	(Ali <i>et al.</i> , 2018); (Tenenbaum, 2004); (Mariano, 2017); (Abreu, 2019); (Schroeder <i>et al.</i> , 2022)
Pode ser construída próxima a fonte de efluentes	(Salviato, 2013)
Não exige treinamento complexo para operadores	(Salviato, 2013)
Pode ser usado para irrigação e fertilização agrícola	(Ali <i>et al.</i> , 2018); (Licata; Gennaro; Tuttolomondo; Leto; La Bella, 2019); (Kaushal; Wani; Patil; Datta, 2016)
Fonte de biomassa e bioenergia	(Licata; Gennaro; Tuttolomondo; Leto; La Bella, 2019)
São habitats para actinomyctotas, que possuem propriedades médicas, científicas e econômicas	(Kaushal; Wani; Patil; Datta, 2016)
Fonte de água de reuso na aquicultura	(Omotade; Alatis; Olanrewaju, 2019)
Fornecer área de lazer	(Mariano, 2017); (Abreu, 2019)
Favorece temperaturas amenas	(Mariano, 2017)
Possibilita a educação ambiental	(Mariano, 2017); (Abreu, 2019)
Possibilita a valorização de áreas urbanas ao entorno (no caso de Parque Público)	(Mariano, 2017)
Atrativo para o turismo local (no caso de Parque Público)	(Mariano, 2017)
Proporciona controle de enchentes e inundações	(Mariano, 2017); (Kvitsjøen <i>et al.</i> , 2021)
Tratamento de águas pluviais	(Lemos, 2016)
Potencial para controle de poluição difusa	(Lemos, 2016)
Flexibilidade diante de objetivos diferentes de projetos	(Lemos, 2016)
Enriquece a biodiversidade \ fornece habitat para vida selvagem	(Comissão Europeia, 2019); (Abreu, 2019); (Kvitsjøen <i>et al.</i> , 2021)

Não utiliza produtos químicos	(Comissão Europeia, 2019)
Pode gerar economia	(Monteiro, 2014); (Leal, 2019)
Corrobora com ideias de saneamento sustentável e segregação de efluentes	(Monteiro, 2014)
Integra-se ao meio ambiente e à comunidade de forma não agressiva	(Monteiro, 2014)
Sustentabilidade ambiental capaz de reduzir emissões de metano	(Boratto <i>et al.</i> , 2021)
Controle de poluição de água urbana	(Oral <i>et al.</i> , 2020)

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Em sequência, o Quadro 7 apresenta desvantagens dos sistemas WC citadas pela literatura:

Quadro 7: Desvantagens dos Sistemas *Wetlands* Construídos

Desvantagens	Referências
Elevada área requerida	(Temel; Avcı; Ardalı, 2018); (Mariano, 2017); (Abreu, 2019); (Monteiro, 2014); (Schroeder <i>et al.</i> , 2022); (Lemos, 2016)
Problemas com entupimento de materiais filtrantes \ colmatção	(Temel; Avcı; Ardalı, 2018); (Benassi <i>et al.</i> , 2018); (Mariano, 2017); (Leal, 2019)
Performance é afetada pelos parâmetros de design	(Temel; Avcı; Ardalı, 2018); (Lemos, 2016); (Oral <i>et al.</i> , 2020)
Os de fluxo superficial causam problemas com proliferação de mosquitos \ vetores	(Temel; Avcı; Ardalı, 2018); (Mariano, 2017); (Abreu, 2019)
Necessidade de manejo periódico das macrófitas	(Benassi <i>et al.</i> , 2018); (Mariano, 2017)
Necessidade de avaliação periódica da ecotoxicidade do efluente	(Benassi <i>et al.</i> , 2018)
Taxa de fluxo de operação relativamente lenta	(Cakmak; Apaydin, 2010)
Pode se sobrecarregar com fortes chuvas e inundações	(Cakmak; Apaydin, 2010)
Pode apresentar altos custos CAPEX	(Tenenbaum, 2004); (Mariano, 2017); (Schroeder <i>et al.</i> , 2022)
Pela sua imensa variedade de técnicas, é difícil generalizar sobre a redução na poluição que é capaz de proporcionar	(Tenenbaum, 2004)
Deve ser mantido controle a longo prazo, no caso de reuso, sobre o depósito de sal e sódio no solo	(Licata; Gennaro; Tuttolomondo; Leto; La Bella, 2019)
Vegetais irrigados com efluente de reuso devem ser desinfetados	(Licata; Gennaro; Tuttolomondo; Leto; La Bella, 2019)
WC com monoculturas apresentaram menores eficiências	Licata; Gennaro; Tuttolomondo; Leto; La Bella, 2019); (Kaushal; Wani; Patil; Datta, 2016)

Efluente final com altas concentrações de <i>Escherichia coli</i>	(Castorina <i>et al.</i> , 2015); (Rizzon, 2020)
Necessidade de medidas de proteção à saúde pós-tratamento, no contexto de reuso	(Castorina <i>et al.</i> , 2015)
Necessidade de monitoramento do sistema solo-planta no contexto de reuso devido a contaminação microbiana	(Castorina <i>et al.</i> , 2015)
Necessidade de dar destino correto à biomassa gerada pelo sistema	(Mariano, 2017)
Gera odores não agradáveis no caso de projetos ou operações precárias	(Mariano, 2017)
Necessidade de implantação e manutenção de infraestrutura física para receber público (no caso de Parque Público)	(Mariano, 2017)
Risco do contato de visitantes com efluentes em tratamento (no caso de Parque Público)	(Mariano, 2017)
Eventos extremos podem comprometer o sistema	(Lemos, 2016)
Precipitação superior ao habitual pode atrasar o processo de construção e causar aumento de custos	(Comissão Europeia, 2019)
Imprecisão para critérios de design e operação	(Abreu, 2019)
Complexidade biológica e hidrológica do sistema	(Abreu, 2019)
Falta de conhecimento do processo	(Abreu, 2019)
Altos custos de alguns meios de enchimento	(Abreu, 2019)
Necessita de desinfecção final para possibilitar o reuso	(Monteiro, 2014); (Leal, 2019)
Grande quantidade de materiais necessários	(Schroeder <i>et al.</i> , 2022)
Não é capaz de eliminar completamente os CECs - Contaminantes emergentes - ou micropoluentes	(Oral <i>et al.</i> , 2020)

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Na pesquisa de Temel, Avcı e Ardalı (2018), um sistema WC subsuperficial de fluxo horizontal é projetado para tratamento de esgoto doméstico em área rural na vila de Kızılcäören, cidade de Samsun, Turquia. São comparados os níveis de remoção de poluentes das macrófitas *Juncus acutus* (junco agudo) e *Cortaderia selloana* (conhecida como capim dos pampas) em conjunto com fatores meteorológicos. Com uma população de 437 habitantes, o projeto se mostrou eficiente, mais econômico quando comparado aos tratamentos convencionais e favorável aos serviços ecossistêmicos. Foi observado o pico da atividade de remoção de poluentes em conjunto com o aumento de temperatura da primavera, sendo a máxima eficiência de remoção com a planta *Juncus acutus* de 40% e com a planta *Cortaderia selloana* de 33%. O sistema foi considerado uma boa opção para pequenas comunidades rurais e proteção ao meio

ambiente, com a indicação da implantação em conjunto com o governo local e para tratamento secundário e terciário.

Já no trabalho de Salviato (2013), foi realizado um estudo sobre uma estação de tratamento instalada em uma vinícola na Serra Gaúcha, onde é utilizada a tecnologia WC para polimento final do efluente industrial advindo da produção de vinho. Durante seis meses foi avaliado o desempenho do polimento final e da evapotranspiração do sistema onde encontraram-se níveis médios de eficiência. Algumas vantagens citadas foram: a possibilidade de construção próxima à fonte de efluentes, a não exigência de treinamento complexo para operadores e o uso de pouca ou quase nenhuma energia elétrica, com ênfase na radiação solar como principal fonte. Assim, “o uso de áreas alagadas também tem sido reportado como estratégia de ecologia, conservação e manejo de vida silvestre” (Salviato, 2013, p. 15).

Um experimento conduzido em Sicília, na Itália, é descrito por Licata, Gennaro, Tuttolomondo, Leto e La Bella (2019). Dois sistemas subsuperficiais de fluxo horizontal foram analisados com o objetivo de demonstrar que a escolha das macrófitas e a manutenção da vegetação podem afetar de modo significativo a performance de remoção de poluentes. Os resultados demonstram que a policultura foi mais eficiente do que a monocultura nos sistemas, e não somente o tipo de planta, mas também o tipo de sistema WC é importante para os níveis de remoção de poluentes. Além disso, o efluente final pode ser reutilizado para irrigação e fertilização, desde que com a desinfecção e cozimento dos vegetais antes do consumo em conjunto do controle ao longo prazo sobre o depósito de sal e sódio no solo. A pesquisa também aponta o uso da biomassa dos sistemas WC como possível fonte de bioenergia.

No estudo feito por Kaushal, Wani, Patil e Datta (2016), é avaliada a eficácia para remoção de coliformes fecais e caracterização das comunidades microbianas presentes em um sistema WC presente na fazenda do *International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics* (ICRISAT). O efluente a ser tratado é de esgoto doméstico de uma comunidade de 1000 habitantes, aproximadamente. O sistema é composto, inicialmente, por uma lagoa de tratamento primário e em seguida por doze células de tratamento, sendo seis do tipo subsuperficial e seis do tipo superficial. Nas pontas têm-se duas células de controle sem vegetação. Com foco na eficiência do tratamento a longo prazo, foi verificado que no início da operação a remoção de coliformes fecais é menos aparente em relação aos estágios finais. A remoção de coliformes fecais também foi maior em células com mais de uma planta, em comparação com as células sem plantas e com uma planta somente. Os autores indicam a comercialização de

biofertilizantes devido aos resultados de aumento na produtividade das colheitas e uso de bactérias do tipo actinomycetotas que possuem propriedades médicas, científicas e econômicas e têm nos *Wetlands* Construídos um *habitat*.

A avaliação conduzida por Castorina *et al.* (2015) apresenta foco na água para reuso em irrigação de vegetais, monitorando e avaliando os impactos ambientais no solo, na qualidade da colheita e no equipamento utilizado para irrigação. Com a implantação de dois cenários de irrigação por gotejamento, um com água de reuso e outro com água fresca, a água de reuso é proveniente de um *Wetland* Construído subsuperficial de fluxo horizontal utilizado como tratamento terciário para o efluente sanitário de uma pequena comunidade rural com cerca de 5000 habitantes chamada *San Michele di Ganzaria*, em Sicília, na Itália. Apesar de níveis altos de *Escherichia coli*, sempre acima dos limites permitidos, os autores afirmam que os níveis apresentados não incorrem riscos de contaminação por rotavírus nos parâmetros da Organização Mundial de Saúde. O solo irrigado com o efluente final de reuso apresentou certa resistência à contaminação microbiana, exaltando a importância do monitoramento do sistema solo-planta no caso de irrigação com água de reuso e a necessidade de implantação de medidas de proteção à saúde pós-tratamento com WC.

Já no trabalho de Omotade, Alatise e Olanrewaju (2019) é avaliada a performance de um sistema WC à base de carvão no tratamento de água resultante da aquicultura. O estudo foi conduzido na Nigéria, mais especificamente no *Department of Fisheries and Aquaculture Technology Teaching and Research Farm*, pertencente à *University of Technology Akure*, no estado de Ondo. Duas macrófitas foram utilizadas: *Sacciolepis africana* e *Commelina cyanaea*. Os resultados demonstram potencial do sistema para tratamento e reuso de efluentes da aquicultura e para prevenção da degradação ambiental e o uso é recomendado, principalmente, em países em desenvolvimento devido ao seu baixo custo. Da mesma forma, afirma Tenenbaum: “devido à simplicidade de operação e manutenção, parece ser a tecnologia mais promissora para ser aplicada em países em desenvolvimento” (Tenenbaum, 2004).

A dissertação apresentada por Mariano (2017) apresenta os WC no contexto urbanístico e paisagístico, ao estudar os potenciais benefícios e desafios do uso da tecnologia para pós-tratamento de efluente gerado por empresa do setor sucroenergético, em conjunto com um parque urbano. O autor afirma que o uso de plantas (ornamentais ou não) fornece um aspecto suave e paisagístico ao sistema, com funções de preservação ambiental associadas ao urbano e social. Como, por exemplo: ao ser uma área verde capaz de oferecer opções de lazer;

temperaturas mais amenas com as funções da água e da evapotranspiração como reguladores; ao favorecer o controle de enchentes; ao possibilitar a educação ambiental como exemplo de tratamento de esgoto sustentável; e até financeiramente, ao valorizar as áreas ao entorno e possibilitar o aumento do turismo local – através do parque como atrativo. Por outro lado, as desvantagens citadas são: a constante necessidade de manutenção da vegetação; a necessidade de dar um destino correto à biomassa gerada; a possibilidade de gerar odores desagradáveis no caso de projetos e operações precárias; a proliferação de mosquitos (para os de fluxo superficial); a necessidade da implantação e manutenção de infraestrutura física para acomodar o público; o risco do contato físico do público com os efluentes; o custo elevado para aquisição de grandes áreas; e o risco de colmatação do leito. Ao final, o autor elabora uma proposta com as dimensões e a melhor localização para implantação do sistema em Estância Turística de Barra Bonita, São Paulo.

Os *Wetlands* Construídos são estudados como medida de controle de poluição difusa, transportada pela chuva aos corpos hídricos receptores, na dissertação de Lemos (2016). O estudo é conduzido sobre a bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho, na cidade de São Carlos em São Paulo, através de modelagens em quatro áreas da bacia. Os resultados apontam que os sistemas WC são bem-sucedidos na redução de cargas e concentrações na bacia, com influência de infiltração no processo. Ao contrário de outros modelos, no caso de sistemas para tratamento de águas pluviais, o autor destaca que a infiltração – com a não impermeabilização do solo – é uma vantagem na remoção de cargas. E, no caso da impermeabilização, áreas maiores seriam necessárias. Da mesma forma, o uso conjunto de jardins de chuva ou poços de infiltração pode reduzir a área necessária para os WC superficiais.

A publicação da Comissão Europeia (2019) apresenta estudo sobre o caso do Ecoparque da empresa Natura, na cidade de Benevides – Pará. O Ecoparque é composto por Jardins Filtrantes que tratam cerca de 132 m³ de efluente sanitário proveniente da fábrica de cosméticos da empresa. Em operação desde 2013, os sistemas demonstram eficiência com análises periódicas e restrições exigidas pelo Departamento do Meio Ambiente. É citada a visibilidade que o projeto levou à marca da empresa nos meios de comunicação social. Além disso, são vantagens citadas, como: enriquecimento da biodiversidade, não utilização de produtos químicos, não geração de lodo, pouca demanda energética. O fator de sucesso especificado foi a correta dimensão e configuração do projeto desde seu início. Como fator

limitante, é citado o alto índice de precipitação, acima do ordinário, ocorrido durante a construção que resultou em atraso e aumento de custos.

Outro estudo de caso é apresentado no trabalho de Abreu (2019) sobre um WC híbrido em operação há 50 meses, na data da pesquisa, instalado para tratamento de esgoto sanitário de uma empresa com o máximo de 650 pessoas. O autor detalha a instalação: “O sistema é composto por pré-tratamento para separação de sólidos grosseiros, tanque de recebimento e equalização do esgoto e aeração do mesmo, *wetlands* verticais subsuperficiais, *wetlands* horizontais subsuperficiais e *wetlands* horizontais superficiais (...)” (Abreu, 2019, p. 43). Algumas vantagens elencadas são a tolerância para diferentes vazões hidráulicas e de cargas contaminantes, *habitat* para vida selvagem, área recreativa e educacional. Algumas desvantagens citadas são imprecisões para critérios de projeto, custos altos de alguns meios de suporte e a proliferação de vetores de doenças nos modelos superficiais.

Monteiro (2014) realiza estudo de caso sobre o uso de WC no tratamento de águas cinzas de uma residência e um escritório. Águas cinzas são caracterizadas pelas águas residuárias residenciais sem as águas de vaso sanitário, como por exemplo, as águas de pias, chuveiros e lavagens de roupas. O sistema residencial pesquisado é do tipo subsuperficial horizontal e para o escritório é do tipo subsuperficial vertical com bombeamento, diferentes devido às origens também diferentes dos efluentes. Ambas as instalações apresentaram altos níveis de remoção de poluentes. O autor informa que a tecnologia pode gerar economia, alinha-se ao saneamento sustentável e à segregação de efluentes e se integra ao meio, tanto ambiental como comunitário, de forma não agressiva. A elevada área requerida é novamente citada como desvantagem, assim como a necessidade de desinfecção final para proporcionar o reuso.

Em Uberlândia, Minas Gerais, duas unidades de tratamento com WC superficial de fluxo vertical foram avaliadas por Leal (2019). O tratamento consistiu no polimento em escala piloto do efluente resultante de tanque séptico seguido de filtro anaeróbico advindo de um condomínio empresarial. Na primeira unidade é utilizado como meio de suporte o resíduo de cerâmica e a espécie *Eleocharis acutangula*, enquanto na segunda unidade é utilizado brita e a espécie *Typha sp.*. As instalações demonstraram altos níveis de remoção de fósforo e satisfatório nível de remoção de nitrogênio. De qualquer forma, o reuso é limitado:

Mesmo considerando satisfatória a eficiência do *wetland* construído com resíduo de cerâmica e com a macrófita do cerrado, *E. acutangula*, o reuso seria permitido apenas para uso Classe 4 previsto na NBR 13969/97, o qual se destina a irrigação pontual ou

escoamento superficial de pomares, cereais, forragens e pastagem para gados. Tal limitação se deve ao parâmetro coliformes fecais, que necessitaria de uma fase de polimento, ou otimização do próprio sistema (Leal, 2019, p. 54).

Outra desvantagem citada pela autora é a necessidade de alternância no regime de alimentação do sistema para evitar a colmatação. Dentre as vantagens estão a possibilidade de gerar economia e a sustentabilidade.

Uma análise de longo prazo foi realizada por Rizzon (2020) sobre um WC de tratamento de água cinza proveniente de lavanderia presente em residência rural unifamiliar. Dados históricos de um período de operação de 10 anos foram analisados em conjunto com análises qualitativas. O sistema é composto por tanque séptico e WC de escoamento subsuperficial de fluxo horizontal, com a macrófita *Cyperus papiros*. O efluente inicial apresentou altas concentrações de poluentes, porém o tratamento foi de elevada eficiência com baixos desvios padrões ao longo do período. No entanto, não houve remoção efetiva de *Escherichia coli*, o que o autor afirma ser comum em sistemas WC.

A pesquisa realizada por Kvitsjøen *et al.* (2021) na Noruega verifica a possibilidade de utilização de tecnologia que não utiliza a escavação para reparo de sistema de esgoto combinado – tubos, túneis, estações – com capacidade insuficiente. A metodologia envolve uma abordagem analítica de águas pluviais e avaliação de sistemas de esgoto. Desta forma, são analisados três cenários: o primeiro com o uso do reparo sem escavação em conjunto com medidas LID (*low impact development* ou desenvolvimento urbano de baixo impacto); o segundo com o uso do reparo sem escavação em conjunto com medidas LID e GI (*green infrastructure* ou infraestrutura verde); e o terceiro cenário que consiste somente em aumentar a capacidade dos canos. Neste contexto, os WC são considerados como tecnologia de infraestrutura verde (GI), esse tipo de medida é caracterizada pelo uso de áreas naturais e seminaturais desenhadas em rede para fornecer serviços ecossistêmicos e proteger a biodiversidade. Seu uso intensivo pode reduzir o risco de inundações e a velocidade de escoamento, apesar de ainda existirem riscos residuais no caso de eventos extremos. Os resultados demonstraram que o primeiro cenário reduz de forma significativa os custos, porém é o segundo cenário que apresenta a maior redução de riscos.

A revisão realizada por diversos autores (Oral *et al.*, 2020) sobre soluções baseadas na natureza para gestão da água urbana na Europa é voltada para cidades em busca da economia circular. Em uma análise de estudos de caso e da literatura, o foco é em um ciclo funcional e

seguro da água urbana, onde há controle de poluentes perigosos de águas residuárias e, ao mesmo tempo, utilização de nutrientes fornecidos através de irrigação, uso recreacional e outros. Nessa pesquisa, os WC são analisados como medida para controle de poluição da água urbana e podem ser usados para tratamento de águas pluviais, tratamento de transbordamento de sistema combinado de esgoto, polimento de efluentes finais de sistemas de tratamento já existentes, tratamento de águas cinzas e provimento de água para reuso. Por outro lado, os autores afirmam que a tecnologia não é capaz de remover completamente os CEC's, contaminantes emergentes, ou micropoluentes.

O trabalho de Araújo *et al.* (2021) explica que micropoluentes são uma diversa gama de substâncias, desde produtos farmacêuticos, de higiene, drogas ilícitas, produtos industriais e até elementos tóxicos e radioativos. É uma temática ainda pouco investigada, de modo que as estações de tratamento não foram projetadas para eliminar tais substâncias. Segundo os autores, os WC apresentam potencial para tratamento de micropoluentes, principalmente se incorporar estudos da temática ao design de projetos.

A discussão entre tratamentos centralizados e descentralizados integra o debate sobre soluções para a universalização do esgotamento sanitário. Assim sendo, a seção seguinte analisa a tecnologia como solução descentralizada para a universalização e à luz das vertentes teóricas discutidas previamente.

8 WETLANDS CONSTRUÍDOS COMO SOLUÇÃO DESCENTRALIZADA À LUZ DAS VERTENTES TEÓRICAS

O sistema de tratamento de jardins filtrantes ou *Wetlands* Construídos é considerado um tipo de tratamento descentralizado de esgoto. Descentralizado, pois o efluente é tratado próximo à fonte. O trabalho realizado por Libralato, Ghirardini e Avezzù (2012, p. 63-64) evidencia as principais características deste tipo de tratamento:

- É capaz de responder a áreas suburbanas e centros rurais, industriais, comerciais e residenciais, assim como ao crescimento populacional em áreas rurais e em países em desenvolvimento;

- Tem a capacidade de deter o declínio da qualidade das águas superficiais;

- Pode auxiliar no caso de grandes blocos de construção em áreas metropolitanas, com o pré-tratamento, tratamento e reutilização das águas residuais, mesmo que em parte, sendo possível limitar o volume de efluente lançado no sistema de coleta existente;

- Pode contribuir no planejamento do desenvolvimento de comunidades isoladas;

- Estimula a recuperação e o reuso de águas residuais;

- Reduz e exclui as inconveniências relacionadas ao sistema de coleta, com uma tubulação menor e mais curta;

- É aplicável a diferentes níveis, do individual ao comunitário;

- Pequenas estações de tratamento são consideradas viáveis no caso de implementação de tecnologia de nível médio/alto que seja eficiente, robusta, de fácil manutenção e gestão, apesar de performances ruins serem vistas, principalmente, devido à sua manutenção;

- Pequenas estações de tratamento estão aptas a serem facilmente controladas, facilitando a manutenção;

- A maior parte dos custos pode estar relacionada a possíveis economias de escala alcançadas organizando o tratamento em um aglomerado;

- O custo de tecnologias de tratamento descentralizado está se tornando comparável ao do tratamento centralizado por unidade de carga orgânica tratada;

- Pequenas estações de tratamento asseguram um maior nível de sustentabilidade ambiental ao reforçar o potencial de reuso das águas residuais tratadas assim como a recuperação de nutrientes;

-A possível contaminação por metais e xenobióticos (substâncias químicas estranhas ao corpo humano) de nutrientes a serem reusados pode ser, em geral, altamente reduzida;

-É possível reduzir eventos de eutrofização;

-Permite a separação de urina na fonte e a remoção de micropoluentes;

-Pequenas estações de tratamento permitem a separação de esgoto doméstico e água da chuva, evitando o fenômeno da diluição;

-É possível realizar a separação de contaminantes na fonte, facilitando seu tratamento e o potencial de reuso e, ao mesmo tempo, aumentando a eficiência do tratamento e a economia de energia;

-Permite excluir a possibilidade de contaminação do esgoto doméstico por esgoto industrial, assim como o lodo produzido;

- É possível maximizar o reuso *in situ*, como consequência da diminuição do volume de lançamento total e do potencial de impactos cumulativos nos corpos hídricos receptores;

-É possível reduzir consideravelmente o risco de saúde para a população, assim como prevenir eventos catastróficos;

-Pequenas estações de tratamento são adequadas para comunidades isoladas, dispersas ou no caso onde somente uma pequena área está disponível para a instalação;

-Pequenas estações de tratamento são normalmente compactas, com condições de operação altamente flexíveis e com impacto estético reduzido.

Uma parte significativa das características descritas é observada para a solução WC em específico, como foi citado no capítulo anterior. Em contrapartida, as soluções de tratamento centralizado possuem suas características positivas e suas limitações resumidas em (Libralato; Ghirardini; Avezzi, 2012, p. 63):

-Os custos por unidade de volume para o tratamento de esgoto ainda são competitivos onde o sistema de coleta de esgoto já existe, se comparados com o descentralizado;

-Em torno de 80 a 90% do custo de capital está relacionado com o sistema de coleta com potencial de economias de escala associadas a áreas com alta densidade populacional;

-É previsto que todo o sistema de coleta ou parte dele deve ser renovado a cada 50 ou 60 anos, à parte da manutenção periódica requerida, o que pode gerar interrupções no tráfego e outras utilidades públicas;

- Nutrientes e outros micropoluentes podem não ser removidos;
- Pode ocorrer o fenômeno da eutrofização no corpo hídrico receptor devido aos grandes volumes lançados de água residual tratada;
- Água da chuva é frequentemente drenada de áreas residenciais através da infiltração para o sistema de coleta, causando potencialmente a redução de aquíferos;
- Água residual diluída requer abordagens de tratamento mais caras;
- Intensos eventos de chuva ou contaminação por esgoto industrial podem gerar transbordamento;
- Desastres naturais como terremotos ou ataques terroristas podem causar interrupções ao sistema, gerando poluição no corpo hídrico receptor;
- Deseconomias de escala são possíveis onde longas distâncias devem ser atendidas ou como uma consequência da infiltração por água da chuva;
- Possui uma forte dependência no suprimento de energia elétrica que pode não ser adequada em face a crises políticas e econômicas;
- Grandes volumes de água potável são necessários para manter o sistema de esgoto limpo.

Em busca de solucionar o problema da universalização de acesso ao tratamento de esgoto, os autores concluem que na dicotomia entre centralização e descentralização, a resposta está na não exclusão *a priori* das abordagens de tratamento opostas. A melhor solução para o problema se encontra na integração de ambas com base nas especificidades requeridas por cada situação. Ou seja, a sugestão é da coexistência de vários níveis de centralização e descentralização. Em locais onde já existe sistema de coleta e tratamento implantado não é viável a utilização da alternativa descentralizada, principalmente em áreas densamente populosas. Já para grandes blocos como hospitais, shoppings, aeroportos, escolas e áreas urbanas remodeladas, há a possibilidade de utilizar alternativas de descentralização e possibilitar o reuso, principalmente em áreas que sofrem historicamente de escassez hídrica (Libralato; Ghirardini; Avezzù, 2012).

O estudo de Massoud, Tarhini e Nasr (2009) afirma que a tecnologia mais apropriada é aquela economicamente viável, ambientalmente sustentável e socialmente aceitável. A densidade populacional deve ser considerada, assim como a localização e a eficiência da tecnologia comparada com seus custos. É afirmado, novamente, que em áreas com

comunidades dispersas é mais provável que as soluções descentralizadas forneçam maior custo-benefício. Uma avaliação de custo-efetividade deve ser realizada e considerar os custos de capital para planejamento, construção, além dos custos para operação, manutenção e do valor da terra a ser utilizada. Para a sustentabilidade ambiental, a proteção da qualidade do meio ambiente deve ser assegurada, juntamente da conservação dos recursos, do reúso da água e da reutilização de seus nutrientes, o que significa preocupação com a capacidade de carga do ambiente receptor. Em resumo, o processo de escolha deve considerar o ciclo de vida do sistema incluindo o design, construção, operação, manutenção, reparo e substituição.

O mesmo estudo foca na aplicação de sistemas descentralizados em países considerados em desenvolvimento. Como países considerados em desenvolvimento possuem dificuldades de financiamento para a construção de sistemas centralizados e a falta de experiência técnica para gestão e operação de tais sistemas, a gestão centralizada de sistemas descentralizados é sugerida. Estratégias de gestão devem levar em conta as especificidades sociais, culturais, ambientais e econômicas de cada área. O desenvolvimento de diretrizes para a seleção de sistemas de tratamento para pequenas comunidades pode facilitar a tomada de decisão. Programas de treinamento de trabalhadores municipais são essenciais para uma operação, manutenção e monitoramento apropriados. Finalmente, os desafios podem ser superados através de planejamento adequado e políticas de implementação.

Assim, a solução descentralizada é não somente uma solução de longo prazo para pequenas comunidades e locais rurais, como é mais segura e custo-efetiva, da mesma forma como citado no trabalho de Schroeder *et al.* (2022). Os *Wetlands* Construídos são enfatizados como exemplo de tecnologia viável para países em desenvolvimento que vem ganhando popularidade em países considerados desenvolvidos. Os tanques ou fossas sépticas são reafirmados como solução de tratamento primário e os WC como tratamento secundário (Massoud; Tarhini; Nasr, 2009). O que indica a nova tecnologia como uma possível solução para o avanço do nível de tratamento nas regiões que utilizam a fossa séptica majoritariamente.

Em relação às dificuldades dos países considerados em desenvolvimento para a implantação de projetos com sistemas WC, é relatado na pesquisa de Ali *et al.* (2018): a não-separação dos efluentes municipais e industriais; a necessidade de grandes áreas; a falta de financiamento para o desenvolvimento das instalações e atividades operacionais; o conhecimento insuficiente sobre as espécies de pântano tropical e subtropical e sua ecologia; pouca experiência em pesquisa sobre design, gerenciamento e infraestrutura; dificuldade em

resolver problemas com perdas por alto evapotranspiração e odores em sistemas de pequena escala; riscos de saúde associados com vetores passíveis de causar doenças; pragas e utilização ineficiente economicamente de biomassa de plantas na produção energética. Ao fim, o sistema híbrido de *Wetlands* Construídos é recomendado para países em desenvolvimento atenderem às demandas de irrigação, principalmente os de clima árido, em vista da eficiência do desempenho, utilização de recursos como substratos minerais e plantas aquáticas, condições agro-climáticas adequadas e custo-efetividade.

A pesquisa realizada por Appel (2019) corrobora aspectos citados anteriormente para sistemas centralizados e descentralizados, com ênfase para os sistemas centralizados que são ideais para grandes centros urbanos com alta densidade populacional e apresentam controle facilitado por sua centralização. Os sistemas descentralizados continuam a ser citados como ideais para comunidades rurais, áreas suburbanas, industriais, comerciais ou residenciais, com geração de grandes oportunidades de reutilização. Para os sistemas WC, em específico, sua definição deve se ajustar às necessidades de cada projeto e, independente da configuração adotada, o monitoramento de todos os fenômenos se faz necessário para atingir os objetivos de tratamento e para a integridade do processo. A autora sugere a implementação de manual de operação e controle das estações de tratamento devido à importância do monitoramento. O objeto de estudo da pesquisa de Appel (2019) é interessante pois utiliza o sistema *Wetlands* Construídos em uma lógica de economia circular em conjunto com outras soluções baseadas na natureza, como o vermifiltro⁴, com o objetivo de reutilização da água.

A pesquisa conduzida por Monteiro (2014) afirma que os sistemas descentralizados se adaptam à realidade local, além de reduzir custos com transporte de esgotos e manutenção e favorecer o reuso de efluentes. A descentralização também promove a reflexão da comunidade acerca do meio ambiente, a participação social e a geração de empregos. Outras vantagens são a economia, a proteção ao meio ambiente, a proteção ao investimento do proprietário, a promoção de um melhor gerenciamento da bacia hidrográfica, a solução para comunidades de baixa densidade populacional e para locais em diferentes condições. A proteção à saúde pública, bem como a possibilidade de recarga de aquíferos são mais dos benefícios elencados.

⁴ “As camadas presentes no vermifiltro são responsáveis por separar a fração sólida e líquida presente no efluente, de forma que o material orgânico fique retido e seja digerido pelas minhocas e microrganismos, enquanto a fração líquida é direcionada para parte inferior da câmara (...)” (Appel, 2019 *apud* Ecotelhado, 2018).

Rizzon (2020) reafirma o uso de *Wetlands* Construídos como uma ferramenta de saneamento ecológico, em uma estratégia holística e interdisciplinar em relação à gestão das águas, a partir da qual o efluente gerado não é mais considerado um resíduo, e sim uma fonte de recursos. Ou seja, a recuperação e reciclagem de nutrientes para fins agrícolas, como a irrigação ou a recarga de aquíferos, garantem uma utilização de forma econômica das águas residuárias. É uma forma de recuperar a bioenergia em consideração à segurança alimentar das gerações futuras. Ainda assim, não há uma solução técnica específica, e sim adaptações para servir às necessidades sociais, econômicas e ambientais em cada contexto.

Rodrigues e Van Kaick (2021) indicam a solução de jardins filtrantes ou zonas úmidas como alternativa para regiões rurais, periurbanas e comunidades isoladas através do resultado positivo de experiências conduzidas por meio de parcerias entre universidades, gestões municipais, instituições e comunidades. O sistema WC é visto como uma das tecnologias sociais e descentralizadas capazes de atender a estes contextos e que demandam políticas que respeitem o tempo e o processo de empoderamento das comunidades beneficiadas. Assim, devem visar a compatibilidade entre as características da tecnologia com as especificidades locais, com objetivo de manter a integridade social e ambiental. Ao fim, as parcerias demonstraram seu potencial de atendimento ao ODS – Objetivo do Desenvolvimento Sustentável – 6, relacionado ao acesso universal à água e saneamento:

A participação de universidades no processo de desenvolvimento de tecnologias descentralizadas e sociais, por meio de programas e projetos de extensão, assim como a parceria realizada com outras instituições e atores locais para a implantação e o monitoramento dos *wetlands* construídos, em escala real e com monitoramento ao longo de vários anos, possibilita um importante avanço no aprimoramento desta tecnologia no âmbito científico e socioambiental e no desenvolvimento de políticas públicas (Rodrigues; Van Kaick, 2021, p. 152).

O repasse do conhecimento produzido pelas universidades através de oficinas, por exemplo, e a sua compreensão pelos usuários permite ampliar a capacidade de replicação na própria comunidade, o que adere conotação social à tecnologia. Os autores concluem que os aspectos social e descentralizado dos WC tornam o sistema atrativo para atender às demandas deficitárias das áreas rurais e às metas dos ODS.

A visão dos sistemas de jardins filtrantes como solução sustentável condiz com os fundamentos da Economia Ambiental em suas duas vertentes: Economia dos Recursos Naturais e Economia da Poluição. Dado que é umaecoinovação que permite uma gestão mais racional

e sustentável dos recursos hídricos, evita a degradação ambiental e fornece o reuso de um recurso natural importante, a água. A tecnologia auxilia o sistema produtivo a transpor sua base de exploração de recursos hídricos, com o reuso para irrigação, fertilização, abastecimento e a gestão sustentável, como recarga de aquíferos e lençóis freáticos, distanciando a produção dos limites da escassez. Ou seja, é uma ferramenta do progresso técnico que sinaliza a superação da problemática da disponibilidade dos recursos naturais, na lógica da Economia dos Recursos Naturais.

Na visão da Economia da Poluição, é um instrumento que, ao ser utilizado, tem a capacidade de diminuir externalidades negativas relativas à poluição de corpos hídricos receptores de esgoto e lodo, tanto doméstico, quanto industrial. No entanto, para a geração de maiores impactos positivos, necessita de ampla disseminação. O que requer maior ação do governo, como por exemplo, para programas de coleta e disseminação de maiores informações sobre a nova tecnologia e planejamento, assim como sugeriu Solow (1974). A possibilidade do aumento da eficiência na gestão de águas e tratamento de efluentes aponta a conveniência do uso de políticas públicas para maior implementação do sistema WC e, assim, tornar próximo o alcance da meta de universalização de acesso à coleta e tratamento de esgotos.

Em consideração à lógica neoclássica do mecanismo de preços de mercado, esta não coincide com as características econômicas do setor de saneamento. A água é considerada um bem público e parte do saneamento básico, também considerado direito humano fundamental pelo acesso à saúde. Juntamente com o fato de o setor ser um monopólio natural, interferindo no funcionamento de um livre mercado e inviabilizando a concorrência. Além disso, o setor requer altos aportes de investimentos, que acabam por depender de financiamento público como a experiência mundial indica limitação dos aportes privados (Silva, 2022). Por consequência, soluções que perpassam a privatização, a precificação da água e o auxílio de maiores taxas para controle de custos e da demanda impactam no alcance da universalização e seus benefícios econômicos, sociais e ambientais. O que indica a necessidade de interferência do poder público para o funcionamento pleno do setor, com governança e regulação eficientes.

Pela ótica da Economia Ecológica, o sistema WC é, igualmente, uma solução sustentável. Ao favorecer os serviços ecossistêmicos como de regulação climática, de ciclagem de nutrientes e do ciclo da água, condiz com os elementos ambientais protegidos pela teoria de sustentabilidade forte. É fonte de reuso e reciclagem de nutrientes, porém não se limita a este instrumento considerado paliativo pela abordagem EcoEco em consideração às leis da

termodinâmica. Isso se deve à não existência da reciclagem completa da matéria: a geração de resíduos pode até ser reduzida, porém ainda ocorrerá um desgaste natural ou uma dissipação de energia (Georgescu-Roegen, 2012), o que traz limitações no contexto do tratamento de esgoto fornecido pelo sistema WC.

Portanto, para esta abordagem não basta apenas indicar a solução tecnológica e aplicar políticas públicas de acesso, o monitoramento deve ser realizado. Assim como indica a literatura: há a necessidade de avaliação periódica da ecotoxicidade do efluente (Benassi *et al.*, 2018); deve ser mantido controle a longo prazo, no caso de reuso, sobre o depósito de sal e sódio no solo (Licata; Gennaro; Tuttolomondo; Leto; La Bella, 2019); há a necessidade de monitoramento do sistema solo-planta no contexto de reuso devido à contaminação microbiana (Castorina *et al.*, 2015); e o monitoramento de todos os fenômenos se faz necessário para atingir os objetivos de tratamento e para a integridade do processo (Appel, 2019).

Ou seja, o monitoramento deve ser realizado não somente do processo de tratamento e em vista dos objetivos de reuso, mas do ecossistema onde o efluente será dispensado. Assim, deve ser avaliada sua capacidade de suporte do ecossistema para receber a qualidade e quantidade do efluente fornecidas. Em contrapartida, tal medida é capaz de elevar os custos de utilização dos *Wetlands* Construídos e os requerimentos de qualificação profissional para operação e manutenção do sistema.

Em relação aos processos biológicos presentes no sistema para depuração das águas residuárias, o uso de WC caminha na direção de uma relação entrópica deficitária com foco na energia solar, pois esta é fonte de crescimento das plantas e fornece o equilíbrio do pequeno ecossistema construído. Assim como outras soluções baseadas na natureza que utilizam de pouca ou nenhuma energia elétrica. Ainda, é a energia realmente sustentável na visão da Economia Ecológica, pois a terra é aberta somente para entrada desta que apresenta baixa entropia. O reuso de efluentes para irrigação e fertilização também é pertinente para a valorização de uma agricultura familiar e orgânica.

Uma análise do setor de saneamento em vista do pensamento econômico-ecológico indica um olhar amplo da lógica econômica. O desenvolvimento de soluções, políticas públicas e regulamentações ambientais não dispensa a participação popular, bem como a ampliação do acesso à coleta e tratamento de esgotos a caminho da universalização, já é um grande passo para a saúde das pessoas, a eficiência econômica da sociedade e a proteção a longo prazo do meio ambiente. Todavia, a resolução da problemática ambiental deve ir além, como indicou

Georgescu-Roegen (2012): a atividade econômica é posta dentro dos limites naturais de esgotamento de recursos naturais e poluição, o que indica uma produção e consumo menos deficitários não somente em sua esfera de degradação ambiental, como no uso dos recursos. Como, por exemplo, aliado a um menor uso de água virtual nos processos produtivos e no consumo doméstico, o que também diminuiria a diluição dos efluentes, aumentaria a eficiência no processo de tratamento de esgotos e ‘enxugaria’ a quantidade de efluentes lançados nos corpos receptores.

9 CONCLUSÃO

O objetivo geral deste trabalho foi inferir como a tecnologia do sistema *Wetlands* Construídos pode contribuir para o alcance da universalização do acesso ao esgotamento sanitário no Brasil. Para atingir tal objetivo, as vertentes teóricas da Economia Ambiental e da Economia Ecológica foram discutidas e a dinâmica dos sistemas *Wetlands* Construídos como tratamento de esgoto, além de sua relação com os pressupostos norteadores das teorias, investigadas através da literatura. Como resultado, entende-se que os *Wetlands* Construídos em suas diversas configurações são uma parte da solução para o problema.

Ao ser visto como tratamento descentralizado, este tipo de sistema natural deve ser usado em conjunto com outras soluções descentralizadas, dependendo das características locais, sociais, geográficas, econômicas, culturais e do contexto aplicado. E de forma integrada, nacionalmente, com os tratamentos centralizados convencionais já existentes em grandes centros urbanos. Os *Wetlands* Construídos são viáveis para áreas rurais, periurbanas, suburbanas, isoladas, seja de forma individual, em comunidade ou em grandes blocos como hospitais, condomínios e shoppings; para locais sem limitações de área ou com dificuldades para manter manutenções complexas. No caso do objetivo para reuso em irrigação, fertilização, recarga de aquífero ou até abastecimento, é uma tecnologia recomendada juntamente com o uso de desinfecção final. Uma economia de escala também pode ser alcançada no uso em aglomerado. Por suas características de fácil manutenção, operação e custo-efetividade, a literatura indica o uso em países considerados em desenvolvimento.

Ao ser pertinente com a agricultura familiar e orgânica, ao utilizar da energia solar como principal fonte energética e ao ser considerado um sistema com relação entrópica deficitária, acaba por convergir com os fundamentos teóricos da Economia Ecológica. Como é um instrumento do progresso tecnológico para a solução do acesso ao saneamento, e até do acesso à água através do reuso e da recarga de lençóis freáticos, ao mesmo tempo que fornece depuração de águas residuárias e evita a degradação ambiental de corpos hídricos receptores, é pertinente para a lógica da Economia dos Recursos Naturais e da Economia da Poluição.

Finalmente, para alcançar as metas de universalização de esgotamento sanitário conclui-se que é necessário ampliar políticas públicas de incentivo no uso de *Wetlands* Construídos e de outros sistemas descentralizados no Brasil, principalmente em regiões rurais, isoladas dos centros urbanos e periféricas. O sistema pode ser usado, também, para elevar os

níveis de tratamento nas regiões com predominância no uso de soluções de tratamento primário, como a fossa séptica no caso da região Norte. O poder público deve tomar a frente com governança e regulação eficientes, é o que se espera por parte dos Estados, municípios e da ANA após o novo marco do saneamento. Não somente, o desenvolvimento de manuais com recomendações técnicas de instalação, operação, manutenção, reúso, além da orientação técnica na escolha da melhor tecnologia para cada localidade e contexto podem ser impulsionados pela colaboração de instituições, como universidades, e pela participação popular, como em oficinas que tendem a disseminar o conhecimento e fomentar o uso de tecnologias sustentáveis. Soluções econômicas para a população de baixa renda devem ser implementadas em conjunto para conquistar a universalização.

Como sugestões para futuras pesquisas em solo nacional orienta-se o foco nos níveis de eficácia, eficiência, custos, na possibilidade de remoção de micropoluentes e na comparação entre as diversas configurações de *Wetlands* Construídos com tecnologias convencionais para impulsionar o uso e o conhecimento sobre esta solução baseada na natureza.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Cauê Girão de. **Estudo de caso sobre tratamento de esgoto sanitário através de *wetlands* construídos em escala real no sudeste brasileiro**: questões operacionais, eficiências de tratamento e interferências do tempo de operação e da sazonalidade. 2019. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Versão original.
- ALI, Zeshan *et al.* Treatment efficiency of a hybrid constructed wetland system for municipal wastewater and its suitability for crop irrigation. **International Journal Of Phytoremediation**, [S.L.], v. 20, n. 11, p. 1152-1161, 29 ago. 2018.
- ALPERSTEDT, Graziela Dias *et al.* Estratégias de Gestão Ambiental e seus Fatores Determinantes: uma análise institucional. **Rae**, São Paulo, v. 50, n. 2, p. 170-186, abr. 2010.
- AMAZONAS, M. de C. **Valor e meio ambiente**: elementos para uma abordagem evolucionista. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Instituto de Economia. Campinas, SP, 2001.
- AMAZONAS, Maurício. O que é Economia Ecológica? **Sociedade Brasileira de Economia Ecológica**, [entre 1999 e 2001]. Disponível em: <<http://ecoeco.org.br/economia-ecologica/>>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- ANDRADE, Daniel Caixeta. Economia e meio ambiente: aspectos teóricos e metodológicos nas visões neoclássica e da economia ecológica. **Leituras de Economia Política**, Campinas, v. 14, p. 1-31, ago.-dez. 2008.
- ANDRADE, Daniel Caixeta. **Modelagem e valoração de serviços ecossistêmicos**: uma contribuição da economia ecológica. 261 f. Tese (Doutorado) - Curso de Desenvolvimento Econômico, Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- ANDRADE, Helisson Henrique Borsato. **Avaliação do desempenho de sistemas de zona de raízes (*wetlands* construídas) em escala piloto aplicados ao tratamento de efluente sintético**. 2012. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.
- APPEL, Daniela Misael dos Santos. **Avaliação do tratamento e da reciclagem de esgoto doméstico para fins não potáveis em empreendimento com certificação LEED**. 2019. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- ARAÚJO, Ronaldo Kanopf de *et al.* *Wetlands* Construídos Empregados ao Tratamento de Micropoluentes Presentes nas Águas Residuárias. In: SEZERINO, Pablo Heleno (org.); PELISSARI, Catiane (org.). **Wetlands construídos como ecotecnologia para o tratamento**

de águas residuárias: experiências brasileiras [recurso eletrônico]. Curitiba: Brazil Publishing, 2021. p. 9-26.

AYRES, Robert; KNEESE, Allen. Production, consumption and externalities. **American Economic Review**, v. 59, n. 3, p. 282-97, jun. 1969.

BAKRI, Alexander Salah. **Valor e Sustentabilidade: Um estudo comparativo entre Economia Ambiental Neoclássica, Economia Ecológica e Marxismo Ecológico**. 2018. 91 f. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2018.

BARBOSA, Rafael Kellermann. **ECONOMIA, MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE: a visão da Economia Ambiental e da Economia Ecológica**. 2008. 55 f. Monografia (Graduação) - Curso de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

BARRETO, André Baxter. **Contribuição da Zona de Raízes em Sistemas Alagados Construídos de Escoamento Subsuperficial Horizontal para Tratamento de Efluentes Sanitários**. 195 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

BENASSI, Roseli Frederigi *et al* (org.). **Manual de Sistemas de Wetlands Construídas para o Tratamento de Esgotos Sanitários: implantação, operação e manutenção**. S.L: Copiart, 2018.

BORATTO, D. C.; BARRETO, A. B.; SEZERINO, P. H.; SOUZA, C. L.. **Wetlands construídos empregados no tratamento de esgoto sob o contexto do saneamento de baixo carbono**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.12, n.7, p.390-405, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.007.0035>

BOULDING, Kenneth. **The Economics of the Coming Spaceship Earth**. 1966. Disponível em: < <http://www.ub.edu/prometheus21/articulos/obsprometheus/BOULDING.pdf>>.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Brasília, DF: Presidência da República, 1997.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Brasília, DF: Presidência da República, 2007.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Brasília, DF: Presidência da República, 2020.

BRASIL. **Plano Nacional de Saneamento Básico - PLANSAB**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2019a.

BRASIL. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. **Programa Nacional de Saneamento Rural**. Brasília: Funasa, 2019b.

BRIX, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment *wetlands*?. **Water Science and Technology**, v.35, p.11-17, 1997.

CAVALCANTI, Clóvis. “Concepções da economia ecológica: suas relações com a economia dominante e a economia ambiental”. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 24, n. 68, 2010.

CAKMAK, B.; APAYDIN, H. Review. Advances in the management of the wastewater in Turkey: natural treatments or constructed *wetlands*. **Spanish Journal Of Agricultural Research**, Madrid, v. 8, n. 1, p. 188-201. 2010.

CASTORINA, A. *et al.* Assessing environmental impacts of constructed wetland effluents for vegetable crop irrigation. **International Journal of Phytoremediation**, v. 18, n. 6, p. 626-633, 7 set. 2015.

CEBALLOS, B.s.O. de; OLIVEIRA, H.; MEIRA, C.M.B.s.; KONIG, A.; GUIMARÃES, A.O.; SOUZA, J.T. de. River water quality improvement by natural and constructed wetland systems in the tropical semi-arid region of Northeastern Brazil. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 44, n. 11-12, p. 599-605, 1 dez. 2001. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2001.0886>.

CECHIN, Andrei Domingues; VEIGA, José Eli da. “A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen”. **Revista de Economia Política**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 438-454, set., 2010.

CLUB OF ROME. **History**. 2022. Disponível em: <<http://www.clubofrome.org/>>. Acesso em: 27 abr. 2022.

COMISSÃO EUROPEIA - Direção-Geral da Investigação e da Inovação. Benevides: Ecoparque Natura – jardins filtrantes. **Diálogo Setorial Ue-Brasil Sobre Soluções Baseadas na Natureza**: contribuição para um roteiro brasileiro de soluções baseadas na natureza para cidades resilientes. [S.L.], p. 104-107, jul. 2019. Publications Office.

COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO - CASAN. **BLITZ INTENSIFICA FISCALIZAÇÃO DE IMÓVEIS COM ESGOTO IRREGULAR EM COQUEIROS**. 2021. Disponível em: <https://casan.com.br/noticia/index/url/blitz-intensifica-fiscalizacao-de-imoveis-com-esgoto-irregular-em-coqueiros#0>. Acesso em: 11 abr. 2023.

COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO - CASAN (Santa Catarina). **CASAN DIVULGA BALANÇO DA GESTÃO 2019/2022**. 2023. Disponível em: <https://www.casan.com.br/noticia/index/url/casan-divulga-balanco-da-gestao-2019-2022#0>. Acesso em: 10 abr. 2023.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO - CNUMAD. **Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 1992.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. 9 p.

CUNHA, Diego de Oliveira da; SEVERIANO JUNIOR, Ely. O uso do tratamento de esgoto sustentável: o estado da arte das *wetlands*. **Revista de Tecnologia Aplicada (Rta)**, v. 7, n. 3, p. 20-35, set-dez, 2018.

DALY, Herman E. **Economía, ecología e ética**: Ensayos hacia una economía en estado estacionario. México: Fondo de cultura económica, 1989.

DALY, Herman. **Una economía de estado estacionario**. Nueva Sociedad, n. 244, mar./abr. 2013.

DIAS, Sofia *et al.* Livestock Wastewater Treatment in Constructed *Wetlands* for Agriculture Reuse. **International Journal Of Environmental Research And Public Health**, [S.L.], v. 17, n. 22, p. 8592, 19 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17228592>.

DOMINGOS, Arthur Fernandes; BERRETA, Marcia dos Santos Ramos; REIS, Mateus da Silva. O uso de tecnologia social para tratamento de esgoto doméstico numa comunidade rural de Gramado, RS, Brasil. **Revista Gestão e Políticas Públicas**, v. 8, n. 2, p. 316-336, 2018.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2ª edição. Interciência: Rio de Janeiro – RJ. 1998.

FRANCO, Marco Paulo Vianna. **The Georgescu-Roegen Versus Solow/Stiglitz Forum as the Epitome of the Thermodynamic Criticism to Growth Theory**. In: PAVAN, Lucca Simeoni (org.). *Economia Ecológica*. Ponta Grossa (Pr): Atena Editora, 2018. p. 123-134.

GALVÃO, A. C.; PAGANINI, W. S. Aspectos conceituais da regulação dos serviços de água e esgoto no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 79-88. Rio de Janeiro: jan-mar de 2009.

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. **O Decrescimento**: entropia, ecologia, economia. São Paulo: Senac, 2012.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HUNT, E.K.; LAUTZENHEISER, Mark. **História do Pensamento Econômico**: Uma Perspectiva Crítica. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Benefícios econômicos e sociais da expansão do saneamento no Brasil**. [S. l.]: Ex Ante Consultoria Econômica, 2022. 92 p.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Key Risks Across Sectors and Regions**. In: O'Neill, B., M. van Aalst, Z. Zaiton Ibrahim, L. Berrang Ford, S.

Bhadwal, H. Buhaug, D. Diaz, K. Frieler, M. Garschagen, A. Magnan, G. Midgley, A. Mirzabaev, A. Thomas, and R. Warren. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, 2022.

Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina - IMA. **Relatório Anual de Balneabilidade 2021/22**. Florianópolis, 2022.

JORGE, Wilson Edison. A Avaliação da Política Nacional de Saneamento Pós-64. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da FAU/USP**, São Paulo, v.1 n .2, p. 21-34, dezembro de 1992.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. *Treatment Wetlands*. 2a. ed. [s.l.] Taylor & Francis Group, 2009.

KAUSHAL, M.; WANI, S. P.; PATIL, M. D.; DATTA, A.. Monitoring Efficacy of Constructed Wetland for Treating Domestic Effluent-Microbiological Approach. **Current Science**, [S.L.], v. 110, n. 9, p. 1710-1715, 1 maio 2016. Current Science Association.

KERSCHNER, Christian. **La Economía del Estado Estacionario**: ¿El único camino hacia un futuro sostenible? Apuntes del Cenes, v. 27, n. 46, mar. 2009.

KOTTASOVÁ, Ivana. Incêndios florestais se espalham pelo mundo e atingem novas regiões. **CNN Brasil**, jul. 2021. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/internacional/incendios-florestais-se-espalham-pelo-mundo-eatingem-novas-regioes/>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

KVITSJØEN, J.; PAUS, K. H.; BJERKHOLT, J. T.; FERGUS, T.; LINDHOLM, O.. Intensifying rehabilitation of combined sewer systems using trenchless technology in combination with low impact development and green infrastructure. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 83, n. 12, p. 2947-2962, 25 maio 2021. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2021.198>.

LAZO ARQUITETURA. **Jardins Filtrantes: Purificação natural de águas poluídas**. 2017. Disponível em: <https://www.lazoarquitetura.com/single-post/2017/08/01/jardins-filtrantes-purificacao-natural-de-aguas-poluidas>. Acesso em: 14 abr. 2023.

LEAL, Juliana da Silva Garcia. **Wetland construído para tratamento de efluente secundário de condomínio empresarial, Uberlândia-MG**. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

LE MOS, H. G. **Modelagem de sistemas de wetlands construídas como medida de controle de poluição difusa na bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho, São Carlos-SP**. 2016. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

LIBRALATO, Giovanni; GHIRARDINI, Annamaria Volpi; AVEZZÙ, Francesco. To centralise or to decentralise: an overview of the most recent trends in wastewater treatment management. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 94, n. 1, p. 61-68, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.07.010>.

LICATA, Mario; GENNARO, Maria Cristina; TUTTOLOMONDO, Teresa; LETO, Claudio; LABELLA, Salvatore. Research focusing on plant performance in constructed *wetlands* and agronomic application of treated wastewater – A set of experimental studies in Sicily (Italy). **Plos One**, [S.L.], v. 14, n. 7, p. 1-27, 9 jul. 2019. Public Library of Science (PLoS).

MACEDO, Rodrigo de Campos. "**Economias**" do Meio Ambiente: conceitos básicos e algumas correntes teóricas. In: PAVAN, Lucca Simeoni (org.). *Economia Ecológica*. Ponta Grossa (Pr): Atena Editora, 2018. p. 1-13.

MADEIRA, Rodrigo Ferreira. O setor de saneamento básico no Brasil e as implicações do marco regulatório para a universalização do acesso. **Revista do BNDES**, n. 33, p. 123-154, jun. 2010.

MARIANO, Maximilian Borges. **Sistema de Wetlands Construídas Associados ao Contexto Urbanístico e Paisagístico**: estudo de caso de Barra Bonita/SP. 2017. 106 p. Dissertação de mestrado — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

MARTINEZ-ALIER, Joan. **Economia Ecológica**. International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences, entry 91008, set. 2015.

MARX, Karl. **O Capital**. Crítica da Economia Política. Vol. 1. Livro Primeiro. São Paulo: Nova Cultural, 1996.

MATTEI, Lauro. **Evolução do Pensamento Econômico**. Florianópolis: Departamento de Ciências Econômicas, UFSC, 2011.

MEDEIROS, Elisa Pereira. **Esgotamento Sanitário e Sustentabilidade em Meio Urbano**: A experiência do município de Florianópolis. 82 f. Monografia - Curso de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MEIRA, Celeide Maria Belmont Sabino. Utilização de terra úmidas no tratamento de águas superficiais poluídas: influência do tipo de leito e de macrófita. 2004. 171 f. Tese (Doutorado) – Programa Institucional de Doutorado Temático em Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

MILANI, M. *et al.* Treatment of Winery Wastewater with a Multistage Constructed Wetland System for Irrigation Reuse. **Water**, v. 12, n. 5, abr. 2020.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL - MDR (Brasil). Secretaria Nacional de Saneamento - SNS. **Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021** / Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional. – Brasília/ DF, 2021.

MIRANDA, Amanda. Universidade Federal de Santa Catarina - Ufsc. **UFSC identifica Norovírus em epidemia de diarreia em Florianópolis; vírus pode estar na água e alimentos**. 2023. Disponível em: <https://noticias.ufsc.br/2023/01/ufsc-identifica-norovirus-em-epidemia-de-diarreia-em-florianopolis/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

MONTIBELLER FILHO, Gilberto. **Ecodesenvolvimento e Desenvolvimento Sustentável: conceitos e princípios**. Textos de Economia, Florianópolis, v. 4, n. 1, p. 131-142, 1993.

MONTEIRO, Victória Regina Celso. **Wetlands Construídos empregados no tratamento descentralizado de águas cinzas residencial e de escritório**. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MOTTA, Ronaldo Seroa da. **Manual para Valoração Econômica de recursos ambientais**. Rio de Janeiro, 1997.

MUELLER, Charles C.. Avaliação de duas correntes da economia ambiental: a escola neoclássica e a economia da sobrevivência. **Brazilian Journal Of Political Economy**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 278-303, jun. 1998. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0101-31571998-1265>.

ODUM, Howard T. **Emergy Evaluation**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCES IN ENERGY STUDIES: ENERGY FLOWS IN ECOLOGY AND ECONOMY. Paper. Porto Venere, 1998.

OLIVEIRA, H. S. (2017). **A Mudança do Marco Regulatório do Setor de Saneamento e o Mecanismo do Subsídio Cruzado**. Em Congresso Abes Fenasan 2017, São Paulo.

OLIVEIRA, Isabel Cristina de. Economia Ambiental Neoclássica: análise crítica da relação entre a economia e os recursos naturais. **Revista Científica Eletrônica - Race Interdisciplinar**, v. 01, 2019.

OLIVEIRA, Kalil de; HORÁCIO, Nicolás. Grupo Nd. **Moradores de Coqueiros querem solução para esgoto a céu aberto na praia**. 2022. Disponível em: <https://ndmais.com.br/meio-ambiente/moradores-de-coqueiros-querem-solucao-para-esgoto-a-ceu-aberto-na-praia/>. Acesso em: 11 abr. 2023.

OMOTADE, Ifeoluwa F.; ALATISE, Michael O.; OLANREWAJU, Olawale O. Recycling of aquaculture wastewater using charcoal based constructed *wetlands*. **International Journal of Phytoremediation**, v. 21, n. 5, p. 399-404, 16 jan. 2019.

ORAL, Hasan Volkan *et al.* A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: a critical assessment based on case studies and literature. **Blue-Green Systems**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 112-136, 1 jan. 2020. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/bgs.2020.932>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Declaração da Conferência de ONU no Ambiente Humano**. Estocolmo, 1972.

PEIXOTO, João Batista. **Saneamento básico**: política, marco legal e instrumentos de gestão dos serviços. [S. l.]: Setor de Ciências Humanas e Sociais da Representação da UNESCO no Brasil. Fundação Vale, 2013. 16 p.

PERONDI, T.; WOLFF, D. B.; DECEZARO, S. T.; ARAÚJO, R. K. de. **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, abr./jun. 2020.

PLANELLES, Manuel. Crise ambiental avança e clima extremo desafia o mundo. **El País Brasil**, ago. 2021. Disponível em: <<https://brasil.elpais.com/ciencia/2021-08-01/climaextremo-desafia-o-mundo.html>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

ROMEIRO, Ademar Ribeiro. Economia ou Economia Política da Sustentabilidade. In: MAY, Peter H. **Economia do Meio Ambiente**: teoria e prática. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. p. 3-31.

RICARDO, David. **Princípios de economia política e tributação**. São Paulo: Nova Cultural, Coleção “Os economistas”, 1996.

RIZZON, Fabiola de Fátima. **Monitoramento de Desempenho de Longo Período de um Sistema de Tratamento Unifamiliar de Água Cinza Empregando Wetland Construído**. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

RODRIGUES, Eduardo Bello; VAN KAICK, Tamara Simone. *Wetlands* Construídos como Alternativa para Tratamento de Esgoto para Regiões Rurais, Periurbanas e Comunidades Isoladas. In: SEZERINO, Pablo Heleno (org.); PELISSARI, Catiane (org.). **Wetlands construídos como ecotecnologia para o tratamento de águas residuárias**: experiências brasileiras [recurso eletrônico]. Curitiba: Brazil Publishing, 2021. p. 137-153.

RODRIGUES, M. M. V. Z. **Utilização de wetlands construídos no tratamento de águas residuárias: uma visão geral**. 2016. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso superior de Tecnologia em Processos Ambientais, Departamento de Química e Biologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

RODRIGUES, Ivete; BARBIERI, José Carlos. A emergência da tecnologia social: revisitando o movimento da tecnologia apropriada como estratégia de desenvolvimento sustentável. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 6, p. 1069-1094, dez. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-76122008000600003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 04 ago. 2022. <https://doi.org/10.1590/S0034-76122008000600003>.

ROMEIRO, Ademar Ribeiro. “**Desenvolvimento sustentável**: uma perspectiva econômicoecológica”. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 65-92, 2012.

ROMEIRO, A. R.; MAIA, A. G. **Avaliação de custos e benefícios ambientais**. Cadernos 35. Brasília: ENAP. 2011, 51 p.

- ROUSSO, Benny Zuse. **Avaliação de um sistema híbrido de *wetlands* construídos empregado no tratamento de esgoto sanitário**. 2017. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.
- RUBIM, Cristiane. Tratamento de Efluentes com *Wetlands* e Jardins Filtrantes Construídos Artificialmente. **Revista Tae**, São Paulo, v. 6, n. 34, p. 10-19, dez. 2017.
- SACHS, Ignacy. **Ecodesenvolvimento: Crescer sem destruir**. São Paulo: Vértice, 1986. p. 18.
- SALVIATO, Luis Felipe Krause. **Avaliação de um Wetland Construído para o Polimento de Efluentes Gerados por uma Vinícola na Região da Serra Gaúcha**. 94 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2013.
- SANTANA, Augusta Coelho; SOUZA, André Luís Rocha de. **Acordos Climáticos e os Instrumentos de Redução de Gases de Efeito Estufa à Luz da Economia de Baixo Carbono**. In: PAVAN, Lucca Simeoni (org.). *Economia Ecológica*. Ponta Grossa (Pr): Atena Editora, 2018. p. 237-254.
- SANTOS, L. ; SANTOS, T. ; CARVALHO, J. . **Meio Ambiente e Ecologia na História do Pensamento Econômico: Contribuições para o Campo da Gestão Ambiental**. In: VII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGeT), 2010, Resende. *Anais do VII SEGeT*, 2010.
- SCARPA, Fabiano; SOARES, Ana Paula. **Pegada ecológica: qual é a sua?** São José dos Campos: INPE, 2012. 24 p.
- SCHROEDER, Amanda Kempt *et al.* Avaliação de desempenho e custos aplicada aos *wetlands* construídos e tecnologias normatizadas empregadas no tratamento descentralizado de esgoto. **Revista Dae**, [S.L.], v. 70, n. 236, p. 67-78, 6 abr. 2022. *Revista DAE*. <http://dx.doi.org/10.36659/dae.2022.036>.
- SCRIPTORE, Juliana Souza. **A parceria público-privada no saneamento básico brasileiro: uma proposta para o desenvolvimento do setor**. Ribeirão Preto, 2010.
- SEZERINO, P. H. **Utilização de biofiltros com macrófitas (vertical constructed *wetlands*) como pós-tratamento de lagoas de estabilização aplicadas aos dejetos suínos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002
- SEZERINO, Pablo Heleno *et al.* Experiências brasileiras com *wetlands* construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 151-158, mar. 2015. *FapUNIFESP (SciELO)*. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522015020000096615>.
- SEZERINO, Pablo Heleno; SILVA, Arieleen Reis da. Aplicabilidade dos *Wetlands* Construídos no Tratamento de Esgoto Sanitário e Doméstico. In: SEZERINO, Pablo Heleno (org.); PELISSARI, Catiane (org.). ***Wetlands* construídos como ecotecnologia para o**

tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras [recurso eletrônico]. Curitiba: Brazil Publishing, 2021. p. 9-26.

SILVA, Cláudia Serra Wermelinger. Universalização do Saneamento Básico no Brasil: a agenda 2030, o papel do Estado e os impactos da lei n. 14.026/2020. **Revista do Tribunal de Contas do Estado de Minas Gerais**, v. 40, n. 1, p. 34-56, 2022.

SILVEIRA, Jaylson Jair da. **Elementos de economia matemática II** / Jaylson Jair da Silveira. 2. impri. - Florianópolis: UFSC, 2011.

SMITH, Adam. **A riqueza das nações**. São Paulo: Nova Cultural, 2 vls, Coleção “Os economistas”, 1996.

SOLOW, Robert M. (1974). “The economics of resources or the resources of economics.” **American Economic Review**, v. 64, n. 2, maio, p. 1-14.

TEMEL, Fulya Aydın; AVC₁, Esin; ARDAL₁, Yüksel. Full scale horizontal subsurface flow constructed *wetlands* to treat domestic wastewater by *Juncus acutus* and *Cortaderia selloana*. **International Journal Of Phytoremediation**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 264-273, 23 fev. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2017.1374336>.

TENENBAUM, David J. Constructed *wetlands*: borrowing a concept from nature. **Environmental Health Perspectives**, [S.L.], v. 112, n. 1, p. 44-48, jan. 2004.

TUTTOLOMONDO, Teresa *et al.* Constructed *Wetlands* as Sustainable Technology for the Treatment and Reuse of the First-Flush Stormwater in Agriculture—A Case Study in Sicily (Italy). **Water**, [S.L.], v. 12, n. 9, p. 2542, 11 set. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12092542>.

UNIFESP - Universidade Federal de São Paulo. **Água virtual e pegada hídrica: você sabe o que significam?**. 2023. Elaborado por Priscilla Marcelle. Disponível em: <https://sp.unifesp.br/noticias/agua-virtual-pegada-hidrica-significados>. Acesso em: 05 jun. 2023.

VAN DEN BERGH, J.C.J.M., 2000. **Ecological economics: themes, approaches, and differences with environmental economics**. Tinbergen Institute Discussion Paper, Department of Spatial Economics, Free University: Amsterdam.

VON SPERLING, Marcos; SALAZAR, Bruno Lopes. **Determination of capital costs for conventional sewerage systems (collection, transportation and treatment) in a developing country**. *Journal Of Water, Sanitation And Hygiene For Development*, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 365-374, 15 fev. 2013. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/washdev.2013.063>.

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P.H. **Dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil. Documento de consenso entre pesquisadores e praticantes**. *Boletim Wetlands Brasil*, Edição Especial, dez. 2018. 65 p. ISSN 2359-0548. Disponível em: <<http://gesad.ufsc.br/boletins/>>.

WALDHELM, Jennifer Martins; AZENHA, Thiago Dias; VARGAS, Hermam da Silva. Introdução ao Conceito de Emergia. In: VIII MOSTRA INTERNA DE TRABALHOS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E I MOSTRA INTERNA DE TRABALHOS DE INICIAÇÃO TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO. **Anais Eletrônicos**. Maringá: Unicesumar, 2016.

WETLANDS CONSTRUÍDOS LTDA. **Maiores cases de sistemas *wetlands* construídos ao redor do mundo**. 2020a. Disponível em: <https://www.wetlands.com.br/post/wetlands-construidos-tratamento-grandes-vazoes-industria-e-saneamento>. Acesso em: 07 ago. 2022.

WETLANDS CONSTRUÍDOS LTDA. **Wetlands para tratamento de esgotos: uma solução para efluentes sanitários**. 2020b. Disponível em: <https://www.wetlands.com.br/post/wetlands-para-tratamento-de-esgotos-uma-solucao-para-efluentes-sanitarios>. Acesso em: 26 jul. 2023.

WETLANDS CONSTRUÍDOS LTDA. **Desmistificando os *wetlands* construídos**. 2021. Disponível em: <https://www.wetlands.com.br/post/desmistificando-os-wetlands-construidos>. Acesso em: 07 ago. 2022.

ZINATO, Thamires Maria Campos; GUIMARÃES, Márcia Maria. **Estudo sobre a Utilização de "Wetlands" Construídas para Tratamento de Águas Residuárias no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 8., 2017, Campo Grande. Ibeas – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2017. p. 1-9.