

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

BRENDA FRANCISS CÓNDOR SALAZAR

Mapeamento e revisão de estudos de caso de práticas
de economia circular aplicadas a estações de tratamento de esgoto

São Carlos

2024

BRENDA FRANCISS CÓNDOR SALAZAR

Mapeamento e revisão de estudos de caso de práticas
de Economia Circular aplicadas a Estações de Tratamento de Esgoto

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro(a) Ambiental

Orientador(a): Dra.Sabrina de Oliveira Anicio

São Carlos

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C116m CÔNDOR SALAZAR , BRENDA FRANCISS
Mapeamento e revisão de estudos de caso de
práticas de Economia Circular aplicadas a Estações de
Tratamento de Esgoto / BRENDA FRANCISS CÔNDOR SALAZAR
; orientadora Sabrina de Oliveira Anicio. São Carlos,
2024.

- Programa de e Área de Concentração em --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2024.

1. Economia circular. 2. Estação de tratamento de
esgoto. 3. recuperação de recursos. 4. Circular
economy. 5. sewage treatment plant. 6. recover
resources. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Brenda Franciss Córdor Salazar**

Data da Defesa: 13/11/2024

Comissão Julgadora:

Resultado:

Sabrina de Oliveira Anicio (Orientador(a))

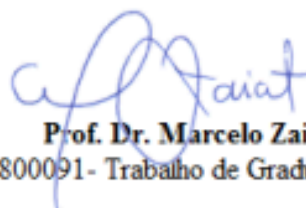
APROVADA

Flavia Mendes de Almeida Collaço

APROVADA

Valdir Schalch

APROVADA



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

Este trabalho é dedicado a minha mãe, pelo seu amor incondicional e suporte econômico; ao meu pai, que seguramente teria gostado de saber que estaria prestes a concluir meus estudos; aos meus irmãos, por estarem sempre dispostos a me ajudar; à minha avó, pela sua presença e as pessoas que me acompanharam de perto nesta jornada no Brasil.

RESUMO

CÓNDOR, S. B. Mapeamento e revisão de estudos de caso de práticas de Economia Circular aplicadas a Estações de Tratamento de Esgoto. 2024.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

Atualmente existem problemáticas político-socioambientais que abrangem desafios locais e globais, como a falta de saneamento básico, escassez de recursos hídricos e insegurança alimentar evidenciados no desperdício de água, poluição, falta de alimentos e doenças recorrentes ao consumo de água sem tratamento. A crescente intensidade e frequência de eventos climáticos extremos e o crescimento populacional tem agravado tais problemáticas, afetando o bem estar da população. Nesse contexto, as Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), além de serem fundamentais para garantir o bem estar social e a saúde pública por meio do tratamento e uso de tecnologias adequadas, são potenciais fornecedores de recursos valiosos, como biossólidos, nutrientes, biogás e água de reuso, quando tratados, monitorados e dispostos adequadamente. Com essas premissas, em este trabalho de conclusão de curso foi realizado um mapeamento e revisão de estudos de caso de práticas e temáticas relacionadas à Economia Circular (EC) das práticas de recuperação de recursos em ETEs. Por sua vez foi realizada uma revisão sistemática da literatura (RSL) de artigos em bases de busca científica publicados entre 2018 e 2022, com isso foram selecionados 32 artigos científicos, com foco em práticas de reaproveitamento de recursos em ETEs que tratam resíduos domiciliares em escala real e piloto ao redor do mundo. Os resultados mostram que, embora o modelo de Economia Circular seja cada vez mais discutido na ciência, suas aplicações em ETEs ainda são limitadas e requerem mais aprofundados em aspectos técnicos e ambientais, além de uma maior regulamentação em alguns países e investimentos para viabilizar a aplicação dos estudos. Este trabalho pretende contribuir como incentivo da sustentabilidade no setor de saneamento e para a formulação e aplicação de políticas públicas que promovam a recuperação de recursos em ETEs, buscando aprimorar a qualidade dos efluentes liberados no ambiente, o reaproveitamento de resíduos como recursos, a produção e reutilização de energia tanto dentro quanto fora das ETEs e o uso do lodo na agricultura, ajudando a combater a insegurança alimentar.

Palavras-chave: Economia circular, estação de tratamento de esgoto, recuperação de recursos

ABSTRACT

CÓNDOR, S. B. Mapping and Review of Case Studies on Circular Economy Practices Applied to Wastewater Treatment Plants. 2024. Monograph (Undergraduate Thesis) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2024.

Currently, political, social, and environmental issues encompass both local and global challenges, such as the lack of basic sanitation, water scarcity, and food insecurity, evidenced by poor management, water wastage, pollution, food shortages, and diseases related to the consumption of untreated water. The increasing intensity and frequency of extreme climate events, along with population growth, have exacerbated these issues, impacting the well-being of communities. In this context, Sewage Treatment Plants (STPs), in addition to being essential for ensuring social well-being and public health through treatment and the use of appropriate technologies, are potential providers of valuable resources such as biosolids, nutrients, biogas, and reclaimed water, when treated, monitored, and disposed of correctly. With these premises in mind, this undergraduate thesis maps and reviews case studies on practices and topics related to Circular Economy (CE) and resource recovery practices in STPs. A systematic literature review (SLR) was conducted on scientific articles published between 2018 and 2022, resulting in the selection of 32 scientific articles focused on resource recovery practices in STPs treating household waste on both full-scale and pilot-scale systems worldwide. The results indicate that, although the Circular Economy model is increasingly discussed in the scientific community, its applications in STPs remain limited and require further development in technical and environmental aspects, along with increased regulation in some countries and investment to enable the implementation of these practices. This thesis aims to promote sustainability in the sanitation sector and to encourage the formulation and application of public policies that support resource recovery in STPs, seeking to improve the quality of effluents discharged into the environment, the reuse of waste as resources, the production and reuse of energy both within and outside STPs, and the use of sludge in agriculture, helping to address food insecurity.

Keywords: Circular economy, sewage treatment plant, recover resources.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EC	Economia Circular
ETEs	Estação de Tratamento de Esgoto
FAO	Food and Agriculture Organization
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OECD	The Organisation for Economic Co-operation and Development
ONU	Organização das Nações Unidas
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
UE	União Europeia
UN	United Nations
UN-Habitat	United Nations Human Settlements Programme
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNICEF	United Nations International Children's Emergency Fund
WWTPs	Wastewater Treatment Plants

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama sistêmico da economia circular.....	12
Figura 2: Processos de tratamento de águas residuais para recuperação de recursos, incluindo reutilização de água, reciclagem de nutrientes e recuperação de energia.....	16
Figura 3: Índices de cobertura de esgotos em áreas urbanas do brasil.....	19
Figura 4: Fluxo de Revisão Sistemática da Literatura para Análise de Estudos de Caso de Circularidade em ETES.....	29
Figura 5: Número de pesquisas selecionadas em escala real e piloto da RSL versus ano de publicação.....	40
Figura 6: Evolução do Interesse Global pelos Termos 'Economia Circular' e 'Circular Economy' no Google Trends entre os anos 2018 e 2024.....	41
Figura 7: Evolução do Interesse Global pelos Termos Relacionados ao Tratamento de Esgoto entre os anos (2018-2024).....	41
Figura 8: Mapa de localização dos estudos de caso selecionados de ETES com práticas de circularidade em escala real e piloto.....	42
Figura 9: Disposição final de lodo de esgoto do tratamento de águas residuais urbanas na UE.....	44
Figura 10: Níveis de estresse hídrico físico.....	45
Figura 11: Proporção da população total que reside em áreas urbanas no mundo e nas diferentes regiões geográficas, 1980-2050.....	45
Figura 12: Tipologia da aplicação da estratégia de aplicação de Economia Circular na ETE segundo a escala.....	46
Figura 13: Percentual de pesquisas encontradas, referente ao recurso aproveitado.....	46
Figura 14: Matriz SWOT para o Manejo e Valorização do Lodo em (ETEs).....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Tipologia do lodo de esgoto.....	18
Quadro 2: Níveis de tratamento de esgotos.....	19
Quadro 3: Técnicas aplicadas ao lodo.....	21
Quadro 4: Etapas para a elaboração da Revisão Sistemática da Literatura.....	26
Quadro 5: Strings utilizadas para a busca de estudos de caso.....	27
Quadro 6: Critérios de inclusão e exclusão da triagem.....	28
Quadro 7: Classificação da RSL para circularidade de ETEs.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação para 1 litro de biogás com outras fontes de energia.....	23
Tabela 2: Condições de Crescimento de Bactérias Fermentativas e Arqueias Metanogênicas, segundo dados de Brasil (2015).....	24
Tabela 3: Número de artigos selecionados por país de origem.....	43

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	16
a) <i>Objetivo geral</i>	16
b) <i>Objetivos específicos</i>	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Economia Circular.....	17
3.2. Transição para a Economia Circular no Tratamento de Esgoto.....	22
3.3. Esgoto sanitário.....	27
3.3.1. <i>Tipos de efluentes</i>	27
3.3.2. <i>Características do esgoto sanitário (esgoto)</i>	27
3.3.3. <i>Tratamento de esgoto</i>	29
3.3.4. <i>Lodo</i>	30
3.3.5. <i>Biogás</i>	33
3.3.6. <i>Efluente tratado</i>	35
4. METODOLOGIA.....	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
6. CONCLUSÕES.....	51
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a população cresceu significativamente, porém em um ritmo lento, e a maioria das pessoas viviam no campo. No entanto, a partir do século XX, o crescimento populacional acelerou, e o estilo de vida começou a mudar diante de novas necessidades. Com isso, as cidades¹ passaram a ganhar destaque, marcando um momento histórico em que o ambiente urbano se consolidou como um novo modo de vida para grande parte da população (TOMBINI; SAQUET, 2014).

A tendência de urbanização² se intensificou nas últimas décadas. Dados recentes da UN-Habitat Brasil (2022) indicam que a população mundial atingiu ao redor de 8 bilhões de pessoas, e desse total, atualmente 55% vivem em áreas urbanas, como cidades e metrópoles. As projeções indicam que essa proporção deve crescer para 68% até 2050. Na América Latina e no Caribe, a urbanização já alcança 81% da população, e no Brasil³ esse índice é ainda maior, alcançando 85% (OECD; UN-HABITAT, 2022). Já na África é provável que a urbanização continue e estabilize pelos 56% por volta de 2050. Estas situações contrastam com os países da OCDE⁴ e do Leste Asiático (OEC, 2016).

Segundo Sathler e Leiva (2022), a expansão urbana dos países em desenvolvimento criou territórios segregados e informais, onde a população de baixa renda foi deslocada das áreas centrais para áreas de expansão urbana menos estruturadas (periferias), devido ao aumento do preço das terras. Os autores destacam que a pobreza e desigualdade estão relacionados aos aspectos socioespaciais urbanos dentro das cidades e que a pandemia de COVID-19 exacerbou tais vulnerabilidades sociais.

¹ Neste contexto, normalmente referem-se a extensos aglomerados urbanos; podem ser grandes, intermédias ou pequenas.

² O Atlas IBGE (2024) define a urbanização como um processo em que a população das cidades aumenta proporcionalmente mais do que a população do campo, quando o crescimento urbano é superior ao crescimento rural (isto seria conhecido como crescimento demográfico urbano segundo a OECD). Já a OECD o define o é o aumento da proporção da população total de um país que vive em áreas urbanas. Mede-se, geralmente, pelo nível que revela a percentagem da população total de um país que se encontra urbanizada.

³ Considerando que a população brasileira cresceu 6,5% em relação ao Censo Demográfico de 2010, atingindo atualmente 203,1 milhões de habitantes, estima-se que 172,6 milhões dessa população vivem em áreas urbanas (IBGE, 2022).

⁴ É uma organização internacional composta por 38 países membros, que reúne as economias mais avançadas do mundo, bem como alguns países emergentes como a Coreia do Sul, o Chile, o México e a Turquia (BRASIL, 2022).

A expansão urbana como a falta ou acesso limitado e confiável, a serviços básicos como água e saneamento, carências que agravaram os problemas de saúde e danos ambientais. (UN-HABITAT, 2022, cap. 3).

Estima-se que ao redor do mundo, uma em cada três pessoas (aproximadamente 2,4 bilhões) ainda carecem de instalações sanitárias melhoradas, e uma em cada oito pessoas (ao redor de 1 bilhão) praticam defecação a céu aberto, causando doenças diarreicas, que é uma das principais causas de morte em crianças menores de cinco anos (UNICEF, 2015). Esse problema é agravado pelo descarte de águas residuais provenientes de atividades humanas em corpos hídricos sem qualquer tratamento, o que representa mais de 80% em escala mundial (UNESCO, 2021).

No Brasil, apenas 39% da carga orgânica⁵ proveniente dos esgotos gerados pela população é removida, sendo este um dos principais indicadores de poluição por esgoto doméstico nos corpos aquáticos próximos a grandes aglomerados urbanos (ANA, 2017). Uma das principais limitações é a insuficiência no tratamento de esgoto, que ocorre em apenas 62,8% dos municípios brasileiros (principalmente nas regiões Centro-Oeste e Sul), enquanto 49,2% dos domicílios ainda não possuem sistemas de esgotamento sanitário (IBGE, 2020).

Frente às limitações no acesso à água, tratamento adequado e aumento das redes e estações de tratamento de águas residuárias ainda é um desafio, especialmente em escala global, portanto, uma ação prioritária é a ampliação desses serviços. Segundo a UN-habitat, (2022) o investimento em infraestrutura de água e saneamento traz retornos econômicos significativos, estimando que a cada dólar investido no desenvolvimento de infraestrutura de água e saneamento gera entre US\$ 4 e US\$ 34 em benefícios. Contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável das cidades, ao aumentar a produtividade urbana e reduzindo custos com saúde pública.

Espíndola e Ribeiro (2020) discutem que o crescimento da população urbana representa um desafio para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e demanda por recursos. Essa expansão exige que as cidades estejam preparadas para responder de forma eficaz, adotando práticas de planejamento e gestão local voltadas para adaptação urbana, mitigando impactos,

⁵ Quantidade total de matéria orgânica presente no esgoto ou em qualquer corpo d'água, e é comumente expressa em termos de massa. Representando a quantidade de matéria que deve ser tratada e removida para evitar poluição. (VON SPERLING, 2005)

prevendo riscos e ampliando a resiliência das cidades e de suas populações.

Dada uma intensa urbanização a extração de recursos aumentou. E como consequência pode alterar os microclimas locais e intensificar a frequência e a gravidade de eventos extremos, como secas e alagamentos (PBMC, 2016), afetando principalmente as populações urbanas, em um contexto onde os efeitos dos impactos das mudanças climáticas são potenciais causadores de conflitos urbanos (BRITTO; PESSOA, 2023).

Como caso particular a indisponibilidade de água potável é uma das principais implicações das mudanças climáticas para o bem estar social. No setor econômico, o uso intensivo de água e solos cultiváveis, são destinados à produção de matérias-primas de biocombustíveis (FAO, 2011).

Portanto, negligenciar a gestão⁶ e gerenciamento⁷ responsável deste recurso pode comprometer tanto a sustentabilidade ambiental quanto a segurança hídrica.

Outra implicação decorrente é a destinação inadequada para os milhões de toneladas de resíduos sólidos⁸ gerados diariamente em todo o mundo, dada pela crescente concentração urbana, e limitações na localização de áreas para destinação final de resíduos. (OTENG ABABIO et al., 2018). O tratamento de esgotos gera, de forma contínua e em grande escala, resíduos sólidos que devem ser reaproveitados ou dispostos adequadamente para evitar impactos negativos no meio ambiente. (BRINGHENTI et al., 2018).

Assim surge a necessidade de explorar alternativas que agreguem valor ao processo das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE)⁹ já existentes. Nesse cenário, a recuperação do valor dos materiais excedentes das ETES torna-se fundamental para implementar os princípios

⁶ Conjunto de normas e diretrizes que regulamentem os arranjos institucionais (identificação dos diferentes agentes envolvidos e seus respectivos papéis), os instrumentos legais e os mecanismos de financiamento. A gestão de resíduos sólidos abrange atividades referentes à tomada de decisões estratégicas e à organização do setor para esse fim, envolvendo instituições, políticas, instrumentos e meios (SCHALCH et al, 2002).

⁷ Realização do que a gestão delibera, através da ação administrativa, de controle e planejamento de todas as etapas do processo. Uma vez definido um modelo básico de gestão de resíduos sólidos, contemplando diretrizes, arranjos institucionais, instrumentos legais, mecanismos de financiamento, entre outras questões, deve-se criar uma estrutura para o gerenciamento dos resíduos, de acordo com o modelo de gestão (SCHALCH et al, 2002)

⁸ Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Brasil, 2010a)

⁹ Conjunto de unidades de tratamento, equipamentos, órgãos auxiliares, acessórios e sistemas de utilidades, cuja finalidade é a redução das cargas poluidoras do esgoto sanitário e condicionamento da matéria residual resultante do tratamento (CONAMA nº 498 de 2020)

da Economia Circular. Reduzindo a carga ambiental de atividades antropológicas, fechando o ciclo através da recuperando a energia, água, nutrientes nas águas residuais, criando o uso circular dos recursos e minimizando o desperdício (MANNINA; GULHAN; NI, 2022).

A recuperação do lodo tratado é amplamente discutida na ciência, pois é um dos subprodutos sólidos produzidos diariamente nas ETEs, podendo ter grande valor agregado, evitando assim a disposição codisposição¹⁰ em aterros sanitários. O lodo é constituído de mais de 95% de água e dada suas características, pode ser aplicado como condicionador de solo, entretanto, uma das principais limitações, que impossibilita a sua utilização em áreas agrícolas, refere-se a elevadas concentrações de metais pesados, assim como a presença de outros compostos potencialmente tóxicos. (BATISTA, 2015).

No Brasil, a disposição final do lodo, tratado ou não, ocorre majoritariamente em aterros sanitários, enquanto outras parcelas são destinadas a terrenos baldios, lixões e aterros controlados, corpos d'água, entre outros, o que representa problemáticas ambientais e econômicas (SOUZA, 2022).

A capacidade energética de produção de biogás dentro das ETEs possui um grande potencial associado à energia química contida e tem origem em um processo biológico (PROBIOGAS, 2010). O metano, principal componente do biogás é considerado um gás indutor do efeito estufa, 21 vezes mais prejudicial para a atmosfera, com relação ao efeito do gás carbônico; portanto a sua recuperação é atribuída para minimizar os impactos ambientais como menor emissão dos gases de exaustão, promovendo processos de produção mais limpos, e auto-eficiência e dentro das ETEs (LAMAS, 2007).

A composição do biogás é influenciada pela técnica de fermentação, tecnologia de construção do reator e o material tratado. Por exemplo, no reator anaeróbio do tipo UASB é possível a recuperação de biogás dentro do próprio reator, a partir do material tratado que é o esgoto bruto ou parcialmente tratado (SILVA et al., 2018). Já em digestores anaeróbios, o material tratado é o lodo que foi removido do esgoto durante etapas anteriores, como decantação ou flotação; este processo tende a ser mais eficiente pois o lodo decantado tem uma concentração maior de matéria orgânica (AMARAL, 2021). Portanto, a otimização da digestão anaeróbia nas estações de tratamento é necessária para maximizar o potencial de descarte de resíduos orgânicos como biossólido e recuperação de energia.

Já a recuperação de efluentes tratados em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs)

¹⁰ Prática de descarte na qual resíduos diferentes são depositados juntos no mesmo espaço de um aterro sanitário

envolve várias possibilidades de reaproveitamento, que podem agregar valor e promover a sustentabilidade. A reutilização de água proveniente do efluente pode ser direta ou indireta, decorrentes de ações planejadas ou não (CETESB, 2024). A utilização da água de reúso segura possibilita que a oferta de água potável seja destinada para fins essenciais, e a de água de reúso, para outros fins, tais como atividades agrícolas, irrigação paisagística e limpeza urbana (GONÇALVES, 2020). Além disso, o efluente tratado pode ser devolvido aos corpos hídricos de forma segura, respeitando os padrões de qualidade.

Dessa forma, a Economia Circular funciona como uma solução sistêmica, baseada nos princípios de "reduzir, reutilizar, reciclar", promovendo a regeneração dos ciclos naturais e minimizando resíduos gerados durante o processo de tratamento (Fundação Ellen MacArthur, 2024). Tratando o esgoto como recursos na forma de água, energia e materiais, tornando o tratamento uma prática mais sustentável.

Nesse contexto, este trabalho visa, por meio de uma Revisão da Literatura e Revisão Sistemática da Literatura, abordar estudos de caso sobre a aplicabilidade da Economia Circular em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), contribuindo para o incentivo à sustentabilidade no setor de saneamento e para a formulação e implementação de políticas públicas que promovam a recuperação de recursos em ETEs.

2. OBJETIVOS

a) Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi o mapeamento de práticas de economia circular em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) em escala real e piloto ao redor do mundo, a partir da análise de artigos científicos obtidos em bases de dados por meio de processos de Revisão da Literatura.

b) Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Mapear estudos de caso em ETEs a partir da revisão sistemática de literatura;
- Analisar os estudos conforme as tipologias e tecnologias das ETEs selecionadas;
- Explorar os casos selecionados na revisão sistemática.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Economia Circular

As atividades econômicas para a satisfação de necessidades ocorreram em todas as épocas da história humana, através da busca do seu crescimento e expansão (ROMAN, 1996). Há 10.000 anos, na Pré-História, a caça, pesca e coleta eram a base da economia, ao decorrer do tempo os grupos humanos foram adquirindo conhecimentos sobre os recursos naturais e gerando tecnologias que permitiram sua exploração (MOTTA; REBOLLAR, 2015).

Na Idade Média, período que corresponde aos séculos V e XV, a atividade econômica era vista como parte integrante da filosofia, moral e ética, orientada por princípios morais e de justiça, pois não existia um estudo sistemático das leis econômicas (VASCONCELLOS; GARCIA, 2004, p. 12).

A economia como ciência se consolidou com a publicação do livro *Riqueza das Nações* de Adam Smith¹¹, publicado em 1776, surgindo uma corrente de pensamento econômico que inaugura a escola clássica de economia política, outorgando assim à economia um estatuto científico, desvinculando-se dos preceitos políticos e filosóficos, embora práticas comerciais e reflexões econômicas já existissem há séculos (MOTTA; REBOLLAR, 2015).

Smith adotou uma atitude liberal e concebia que o livre mercado operado pelo interesse próprio dos indivíduos seria capaz de conduzir ao bem estar social, gerando riqueza suficiente para todos (BIANCHI, 2005). Exaltando a ideia de abundância e progresso econômico ao aumento de produtividade, identifica na contraposição entre homem e natureza, enxergando o homem como um ente capaz de dominar a natureza para seus próprios propósitos (LEÃO; CARVALHO, 2008).

As políticas liberais permitiram o amplo desenvolvimento da indústria e o uso de novas tecnologias energéticas (como a hidráulica e, posteriormente, a máquina a vapor) durante os séculos XVII e XVIII, elevando a produtividade do trabalho (MOTTA; REBOLLAR, 2015). Esses avanços culminaram na Revolução Industrial, que se consolidou

¹¹ Filósofo e economista escocês, além de professor de Filosofia Moral na Universidade de Glasgow, na Escócia. É autor do livro *A Riqueza das Nações*, publicado pela primeira vez em 1776, obra fundamental para o desenvolvimento da economia moderna. Smith foi um defensor da teoria do crescimento econômico e da liberdade econômica, enfatizando o papel da iniciativa individual e do mercado na geração de riqueza (Bianchi, 2005)

na segunda metade do século XVIII na Grã-Bretanha; contudo, este avanço industrial não foi acompanhado de melhoria na qualidade de vida da maior parte da população, gerando grandes custos sociais. Segundo (HAWKEN, 2000) a degradação da natureza a partir do século XVIII foi mais intensa do que em todo o período anterior da história.

No início do século XIX o mundo estava sofrendo alterações fundamentais, como resultado da industrialização¹². Num ritmo de mudança social e econômica visivelmente acelerado, uma das mudanças mais notórias foi a demográfica, a população passou de 600 milhões por volta de 1750, elevando-se para perto de 1.200 milhão em 1850. (SANTOS; ARAÚJO, 2018).

Segundo Dos Santos (2010), toda a economia dos séculos XVIII e XIX era baseada no paradigma da extração. O mesmo cita como exemplo a destruição de florestas dos Estados Unidos subsidiada por políticas agrícolas, e a crise na agricultura britânica pela perda de fertilidade do solo, ocorridas no século XIX.

A partir da década de 1870 (século XIX), surge a escola neoclássica como uma continuação e evolução das ideias da escola clássica, com foco na microeconomia, concentrando-se no comportamento do indivíduo (IZEPÃO; BRITO; BERGOCE, 2020). Essa escola foca principalmente na alocação eficiente de recursos no mercado e não fornece ferramentas analíticas que levem em conta a natureza limitada e esgotável dos recursos naturais (GHISELLINI et al., 2016).

No século XX, como consequência da primeira e segunda guerra mundial¹³, principalmente na Europa, as indústrias dedicadas anteriormente a bens de consumo dedicaram a sua produção para fins bélicos, envolvendo o controle de matérias primas e colônias envolvendo disputas que influenciaram tais conflitos, como a procura por recursos naturais que abalou a economia do continente (MOTTA; REBOLLAR, 2015, pg 178). Depois da Segunda Guerra Mundial, a expansão industrial trouxe fortes incrementos nos fluxos de materiais e de energia passando pelo sistema econômico.

¹² Processo pelo qual uma sociedade transforma sua economia, de um sistema majoritariamente agrário e artesanal para um sistema industrial, onde a produção em larga escala, mecanização e tecnologia são amplamente empregadas. Esse processo envolve o desenvolvimento de fábricas e indústrias que produzem bens de consumo e insumos, gerando aumento da produtividade e eficiência.

¹³ **Primeira Guerra Mundial:** Conflito global ocorrido entre 1914 e 1918, envolvendo as principais potências mundiais em dois blocos: a Tríplice Entente e a Tríplice Aliança.
Segunda Guerra Mundial: Conflito global entre 1939 e 1945, envolvendo o Eixo (Alemanha, Itália e Japão) e os Aliados (principalmente EUA, URSS e Reino Unido).

Com isso, no final da década de 1960, a poluição e a degradação ambiental em algumas cidades industriais e regiões excederam a capacidade do meio-ambiente de assimilá-las e de se regenerar adequadamente. Surgiram, também, os primeiros indícios de perturbações globais provocadas pela poluição (MUELLER, 2004). Na mesma década, a questão ambiental passou a ser considerada nas ciências econômicas, impulsionada pelas crescentes preocupações com a finitude dos recursos naturais, evidenciando a falta de atenção dos aspectos ecológicos nos modelos econômicos. Pioneiros como Kenneth Boulding, Herman Daly e Nicholas Georgescu-Roegen foram fundamentais para introduzir o conceito de ecologia na economia, promovendo uma visão mais sustentável dos limites ecológicos (DOS SANTOS, 2010). Abordagens relacionadas ao funcionamento da economia, com a extração de recursos naturais, renováveis ou existentes em quantidades fixas, foram aprimoradas e sistematizadas; por sua vez, a poluição foi considerada como um distúrbio preocupante, causador de efeitos desfavoráveis ao bem estar social (MUELLER, 2004).

Segundo Dellagnezze (2022), a Conferência de Estocolmo de 1972, se constituiu como um marco global, onde pela primeira vez problemas políticos, sociais e econômicos foram discutidos num fórum intergovernamental, com uma perspectiva de instituir ações corretivas. Em contrapartida no mesmo ano, com uma abordagem mais pessimista o Clube de Roma, publicou o relatório *The Limits to Growth* enfatizando os limites do crescimento econômico devido à escassez de recursos naturais, deterioração ambiental, e acelerado crescimento populacional como um grande problema e prevendo, através de modelos matemáticos, consequências catastróficas (MEADOWS et al., 1972).

De acordo com os pesquisadores ambientais J.T. Lyle e Walter Stahel, os modelos de produção linear convencionais, onde os subprodutos geralmente são eliminados após o uso, não são sustentáveis a longo prazo. Em seu relatório de pesquisa de 1976 para a Comissão Europeia, intitulado *The Potential for Substituting Manpower for Energy*, Walter Stahel ofereceu a ideia de transição do modelo linear de economia dependente de recursos para uma economia em *loop* (BUGAIAN; DIACONU, 2020). Segundo Gureva e Deviatkova (2020), este relatório faz uma das primeiras referências à economia circular.

No ano de 1983, a Assembleia Geral das Nações Unidas instituiu a Comissão Mundial do Meio Ambiente e Desenvolvimento, com o objetivo de sugerir estratégias de implementação voltadas para a preservação ambiental. Nesse contexto, a comissão publicou, em 1987, o Relatório Brundtland, intitulado *Nosso Futuro Comum*. O relatório definiu

desenvolvimento sustentável como 'aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades' (WCED, 1987).

Com o Relatório Brundtland retomando o tema da preservação ambiental, os economistas/professores Pearce e Turner se destacaram na época por abordar novas temáticas e adotar e expandir o conceito de desenvolvimento sustentável, contribuindo significativamente para sua discussão e divulgação (SEROA, 1990).

Segundo Pearce e Turner (1990), ao longo da história, diferentes paradigmas econômicos moldaram a relação entre economia e meio ambiente, mencionando a mudança dos princípios da economia neoclássica para uma economia que considera a finitude de recursos. Nesse contexto enfatizam a importância de fechar os ciclos de materiais na economia, tratando os resíduos como recursos, capaz de ser sustentado a longo prazo.

De acordo com Murray, Skene e Haynes (2017), terminologias como: economia de circuito fechado, não proporcionaram uma análise aprofundada das consequências ambientais e da sustentabilidade dos recursos. Os autores concordam que, como consequência, outras abordagens, como a Economia Ecológica, surgiram na década de 1980, buscando incorporar as limitações ecológicas e os impactos do esgotamento dos recursos naturais.

A Ecologia Industrial também começou a se desenvolver no final dos anos 1980 e início dos anos 1990, mesmo um foco mais específico na aplicação de princípios ecológicos ao setor industrial, visa criar processos de circuito fechado. No ano de 1994, John T. Lyle desenvolveu ideias sobre design regenerativo aplicadas à agricultura, mas com potencial para ser aplicada a outros campos, dando assim as bases da estrutura da economia circular. Em 2002 tais ideias influenciaram a filosofia de design chamada Cradle to Cradle, cujos princípios são inspirados em sistemas naturais sem desperdícios, uso de energia limpa e renovável. Tais escolas de pensamento influenciaram significativamente o que veio a ser formalizado como economia circular (ELLEN MCARTHUR, 2024).

Murray, Skene e Haynes (2017) também discutem a origem e a indefinição do termo Economia Circular, destacando suas amplas definições e a falta de rigor científico ao defini-lo. Além disso, criticam a maneira como a Economia Circular é frequentemente abordada na literatura atual. Considerando isso, nesta revisão bibliográfica, serão abordadas apenas algumas definições de economia circular.

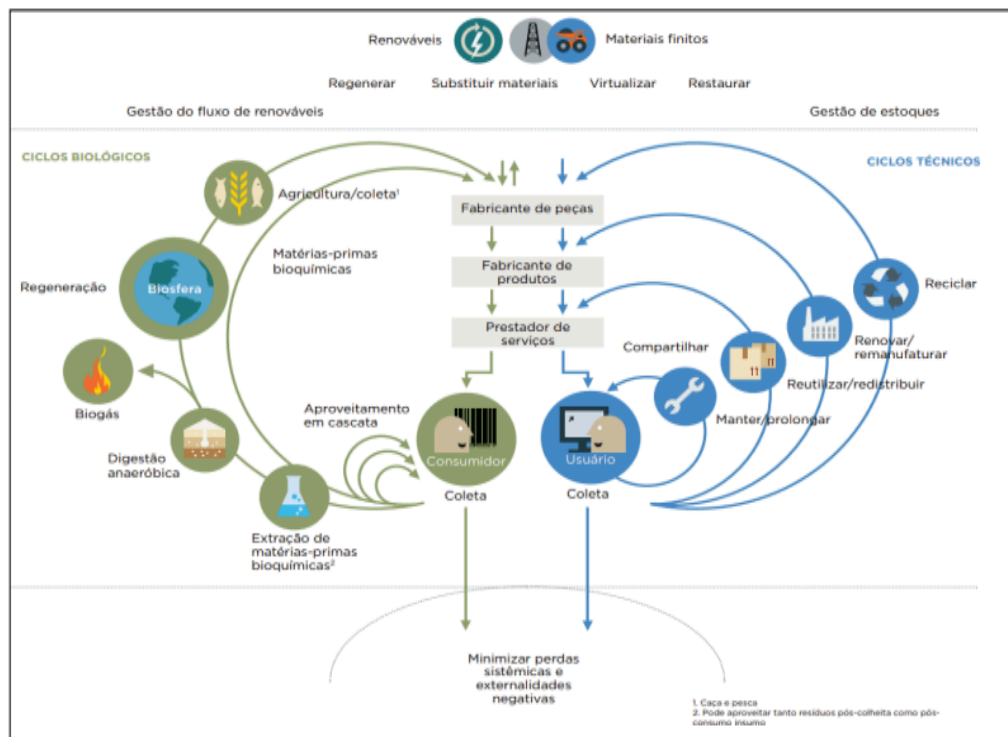
Atualmente, a aplicabilidade da economia circular em sistemas econômicos e processos industriais evoluíram, incorporando diferentes recursos e contribuições de uma variedade de conceitos que compartilham a ideia de circuitos fechados (GEISSDOERFER et al., 2017). A popularização do termo é mais recente, com a seguinte definição apresentada pela Fundação Ellen MacArthur, instituição filantrópica internacional, criada em 2010 a qual define EC como:

Sistema em que os materiais nunca se tornam resíduos e a natureza é regenerada. Numa economia circular, os produtos e materiais são mantidos em circulação através de processos como a manutenção, a reutilização, a renovação, a refabricação, a reciclagem e a compostagem. A economia circular combate às alterações climáticas e outros desafios globais, como a perda de biodiversidade, os resíduos e a poluição, dissociando a atividade económica do consumo de recursos finitos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2024)

Ainda, MacArthur menciona que a transição para uma economia circular não se limita a ajustes visando a reduzir os impactos negativos da economia linear. Ela representa uma mudança sistêmica que constrói resiliência em longo-prazo, gera oportunidades econômicas e de negócios, e proporciona benefícios ambientais e sociais.

O Diagrama Borboleta da economia circular (Figura 1), elaborado pela Fundação Ellen Macarthur, representa o fluxo contínuo de materiais nesse modelo econômico, destacando dois ciclos principais: o técnico e o biológico. No ciclo técnico, os produtos e materiais são preservados em circulação através de práticas como o reúso, reparo, remanufatura e reciclagem. Já no ciclo biológico, os nutrientes provenientes de materiais biodegradáveis retornam ao solo, promovendo a regeneração natural. A Figura 1 mostra a economia circular como um ciclo fechado, onde as perdas são minimizadas e as volatilidades externas são mitigadas.

Figura 1: Diagrama sistêmico da economia circular



Fonte: Fundação Ellen MacArthur, 2024

3.2. Transição para a Economia Circular no Tratamento de Esgoto

Historicamente, o desenvolvimento do saneamento foi impulsionado pelo crescimento populacional, que trouxe consigo o surgimento de doenças causadas pela falta de destinação adequada para os dejetos, resultando na contaminação das fontes de água. (REDALYC, 2023) Os gregos foram precursores dos sistemas modernos de saneamento, conduziam as águas residuais e pluviais para uma bacia de coleta fora da cidade de lá condutos revestidos de tijolos transportavam as águas residuais para campos agrícolas, onde eram usadas para irrigação e para fertilizar plantações e pomares. (LOFRANO; BROWN, 2010).

Os romanos são geralmente citados pela magnificência de seus aquedutos em termos de infraestrutura hidráulica, mas também contribuíram para o desenvolvimento dos sistemas de esgoto. A Cloaca Máxima, construída no (século VI a.C.) é uma das mais antigas e notáveis obras deste tipo permitiu a coleta de esgotos, essa prática tornava as cidades mais habitáveis (DE FEO et al., 2014). Na transição do fim do Império Romano para a Idade Média houve uma queda nas conquistas sanitárias na Europa e consequentemente a proliferação de algumas das doenças e pandemias. Os esgotos implementados na Europa medieval resumiam-se a valas a céu aberto, ou *open sewers*, basicamente retrocedendo às práticas antecessoras aos Romanos (BAPTISTA, 2021)

Segundo Lofrano e Brown (2010) com a queda do império romano, a idade das trevas sanitárias começou e durou mais de mil anos (476–1800). Com a alta taxa de industrialização¹⁴, crescimento populacional e urbanização ao longo do século XVIII, precedendo e acompanhando a revolução industrial, veio a percepção da importância do descarte de resíduos e águas residuais.

No começo do século XX a gestão de águas residuais evoluiu a partir da criação de uma Comissão Real designada pela Rainha do Reino Unido em 1898, com a missão de investigar e relatar métodos adequados para o tratamento e descarte de esgoto, incluindo efluentes industriais. (ROYAL REPORT, 1912). O modelo foi copiado por muitos outros países outorgando uma compreensão da associação geral entre poluição química da água e toxicidade. Os avanços foram interrompidos com o começo da Primeira¹⁵ e fim da Segunda¹⁶ Guerra Mundial, atrasando o desenvolvimento do tratamento de águas residuais até 1948, causando poluição crescente nas águas. Após o fim da guerra, houve um rápido progresso no tratamento de águas residuais no Reino Unido e nos Estados Unidos, mas não na Europa. Em 1950, os debates sobre poluição se concentraram nos padrões de qualidade da água e um avanço adicional na compreensão da contaminação ambiental (LOFRANO; BROWN, 2010).

Na última parte do século XIX, mudanças foram feitas na forma como a água era administrada, e o desenvolvimento de projetos de sistemas de esgoto permitiu a sua coleta e tratamento, visando reduzir o impacto nos cursos de água. Na mesma época a introdução de fossas sépticas também contribuiu para o tratamento das águas residuais em muitas comunidades (GERBA, PEPPER, 2009). Esses avanços marcaram uma mudança na forma de lidar com os dejetos, mas à medida que os grandes centros urbanos e suas periferias se desenvolveram, desde então até à atualidade, o contínuo incremento demográfico e o respectivo aumento de uso de água por parte das comunidades, exponenciaram a produção de águas residuais de origem doméstica, comercial e industrial, bem como a discussão em redor das tipologias de sistemas a implementar, e da complexidade da composição do esgoto (BAPTISTA, 2021)

¹⁴ Processo pelo qual uma sociedade transforma sua economia, de um sistema majoritariamente agrário e artesanal para um sistema industrial, onde a produção em larga escala, mecanização e tecnologia são amplamente empregadas. Esse processo envolve o desenvolvimento de fábricas e indústrias que produzem bens de consumo e insumos, gerando aumento da produtividade e eficiência.

¹⁵ Conflito global ocorrido entre 1914 e 1918, envolvendo as principais potências mundiais em dois blocos: a Tríplice Entente e a Tríplice Aliança

¹⁶ Conflito global entre 1939 e 1945, envolvendo o Eixo (Alemanha, Itália e Japão) e os Aliados (principalmente EUA, URSS e Reino Unido)

O esgoto, pode ser do tipo doméstico ou industrial, contendo compostos orgânicos e inorgânicos. A princípio, a finalidade da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) é remover os poluentes dos esgotos, os quais impactam a qualidade dos cursos d'água. Portanto um sistema de esgotamento sanitário só pode ser considerado completo se incluir a etapa de tratamento (FUNASA, 2019)

Existem diversos métodos para o tratamento de esgoto sanitário. E a escolha do processo de tratamento depende de fatores locais, como urbanização, número de habitantes, densidade populacional, área disponível, características do solo e subsolo, além de aspectos operacionais e socioeconômicos (SOUZA, 2022). Independente da concepção de tratamento, todos resultam na geração de resíduos, sejam eles provenientes das etapas iniciais de tratamento ou dos gases liberados durante reações aeróbias e anaeróbias. (Fajardo, 2019)

A maioria das ETE municipais se concentrou por muitos anos na purificação e descarga de esgoto no meio ambiente. No entanto, nas últimas décadas, com o desenvolvimento das tecnologias e das demandas ambientais por água, um foco especial foi colocado em novas soluções que podem fornecer água, energia e matérias-primas (por exemplo, nutrientes ou materiais orgânicos) para vários processos, como reutilização, reciclagem e recuperação. Segundo o CGEE (2020), existem inúmeras tecnologias inovadoras para o tratamento de esgoto, que incluem sistemas baseados na natureza e sistemas híbridos¹⁷ de alto desempenho, capazes de melhorar a qualidade da água ao ponto de ser potável. Nesse contexto, as ETEs passaram a ser reconhecidas como instalação de recuperação de recursos que fazem parte da transição da Economia Circular, indo além de focar na remoção de poluentes (LARRIBA et al. 2020 ; SMOL, 2023)

Segundo Ometto (2018) a recuperação de recursos pode ser vista como um modelo de negócio que apresenta elementos da Economia Circular, cujo objetivo é recuperar o valor e a funcionalidade de produtos, componentes e materiais por meio de atividades como remanufatura e reciclagem, em ciclos fechados e abertos. Essa abordagem contribui com a diminuição da demanda por recursos naturais minimizando o desperdício. Com essa

¹⁷ São sistemas que têm elementos de mais do que uma lógica básica (...) trabalhando de forma integrada, de modo que cada lógica seja utilizada para oferecer soluções para aquelas subunidades para as quais melhor se encaixe, buscando a otimização ((LEITE; PINTO; BARREIROS, 2010).

perspectiva a Economia Azul¹⁸, o reaproveitamento em cascata¹⁹ de materiais e subprodutos, buscando não apenas a recuperação de recursos, mas regenera-los em harmonia com ecossistemas locais, valorizando a autonomia, gerando emprego e promovendo inovação. (THE BLUE ECONOMY, 2024). Nesse contexto, para transitar para um modelo de Negócio Circular em uma ETE, é essencial promover uma gestão sustentável de materiais e energia. Onde deve-se minimizar a quantidade de geração de resíduos incentivando a sua reutilização como material secundário (NECZAJ, GROSSER, 2018).

A adoção de estratégias circulares nas ETEs podem representar benefícios potenciais. Entre eles, pode-se destacar a eliminação ou mitigação de poluição e de impactos ambientais. No ar, ao evitar a emissão de biogás; no solo, ao reduzir a disposição de lodo de esgoto em aterros; e na água, ao prevenir a liberação inadequada de efluentes contendo resíduos orgânicos e nutrientes. Em termos econômicos, a comercialização de recursos hídricos, energéticos e de nutrientes e redução dos custos de disposição de lodo. Além disso, há benefícios sociais, como a criação de novos empregos e o acesso a produtos de alta qualidade a preços mais acessíveis (ANÍCIO et al. 2022).

O alcance desses benefícios está muitas vezes condicionado às partes interessadas e usuários finais, seguindo as necessidades específicas do local e adequação ambiental. E para adotar as práticas circulares as instalações de tratamento devem ser redesenhadas e modificadas com a ajuda de governos e órgãos científicos (YADAV et al. 2021). De acordo com Ometto et al. (2018), a adoção de condições facilitadoras como políticas públicas, infraestrutura e tecnologias, são essenciais para a transição a partir de um modelo mais lineal.

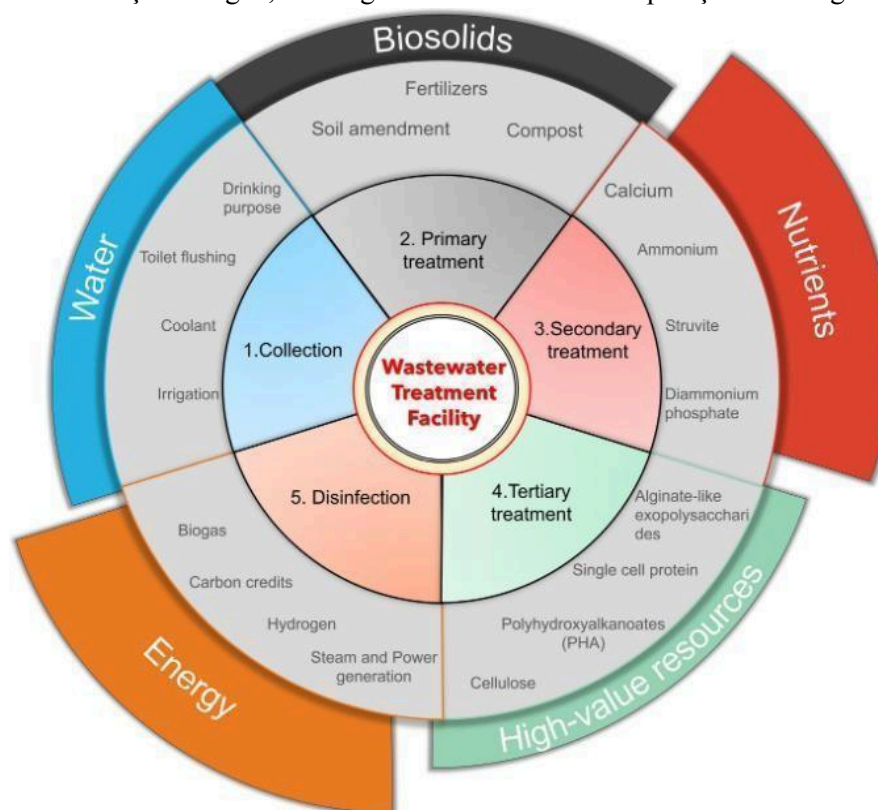
Portanto, para implementar estratégias inovadoras que facilitem o tratamento de resíduos e crie um sistema onde os resíduos sejam convertidos novamente em matéria prima, fechando o ciclo de circularidade e criando sistemas mais auto sustentáveis, deve ser explorada tecnologias inovadoras e emergentes, abrangendo o desempenho técnico, econômico e ambiental, considerando as necessidades globais de nutrientes e recuperação de água e energia. Os quais são os principais impulsionadores para o desenvolvimento dessas práticas (NECZAJ, GROSSER, 2018).

¹⁸ Conceito proposto pelo economista e empresário Gunter Pauli, guiada por 21 princípios é definido como a regeneração dos ecossistemas numa lógica de abundância e autonomia. Inspirando-se na natureza e prezando pela sustentabilidade ambiental sob a ótica da responsabilidade social, com foco no desenvolvimento de comunidades. (THE BLUE ECONOMY, 2024)

¹⁹ Utilização dos resíduos de um produto como insumos para outros.

Segundo Yadav et al. (2021), uma abordagem em etapas é mais eficaz para maximizar a recuperação de nutrientes e produtos energéticos dos fluxos de resíduos, onde processos de tratamento primário²⁰, secundário²¹ e terciário²² são usados em cada etapa dependendo da necessidade de pureza e das características do contaminante. Para aumentar a aplicabilidade nas estações de tratamento de esgoto, a (Figura 2). apresentam processos de tratamento de efluentes focados na recuperação de recursos, conforme ilustrado. Esses processos permitem a obtenção de cinco grupos principais de produtos recuperados, energia/potência, nutrientes, água, biossólidos e compostos de alto valor, alinhando-se aos princípios da economia circular.

Figura 2: Processos de tratamento de águas residuais para recuperação de recursos, incluindo reutilização de água, reciclagem de nutrientes e recuperação de energia



Fonte:Yadav et al. (2021)

²⁰ Inclui a remoção de partículas finas; as águas residuais são mantidas em um tanque, onde os sólidos mais pesados caem no fundo, e os sólidos mais leves ou gordura flutuam para a superfície; os sólidos sedimentáveis e flutuantes são separados; o líquido restante é direcionado para tratamento secundário ou descarregado no reservatório natural.

²¹ Conhecido também como tratamento biológico, remove toda a matéria orgânica restante, sólidos suspensos, vírus, bactérias e parasitas; também pode remover nutrientes ou substâncias químicas até certo ponto.

²² Tratamento avançado (tratamento mais rigoroso), que é aplicado para a remoção dos nutrientes restantes antes do descarte em águas sensíveis (por exemplo, por meio de desinfecção que pode ser usada para remoção adicional de vírus, bactérias e parasitas, ou outros produtos químicos e substâncias nocivas restantes)(SMOL, 2023)

3.3. Esgoto sanitário

Segundo a NBR 9648 (ABNT, 1986) define *esgoto sanitário* como: Despejo líquido constituído de esgotos domésticos e industriais, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária. Conforme definido pela norma há diferentes tipos de despejos que compõem o esgoto sanitário, e podem ser designados simplesmente como *esgotos*.

3.3.1. Tipos de efluentes

- Esgoto Doméstico: Despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas.
- Esgoto Industrial: Despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitados os padrões de lançamento estabelecidos.
- Água de infiltração: Toda água, proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador e que penetra nas canalizações.
- Contribuição Pluvial Parasitária: Parcela de deflúvio (pluvial) superficial inevitavelmente absorvida pela rede coletora de esgoto sanitário.

3.3.2. Características do esgoto sanitário

A maior parte dos esgotos domésticos são constituídos por resíduos líquidos. A tipologia do lodo formado é com base nas fases do tratamento, o lodo pode ser classificado em lodo primário e secundário, e diferem em quanto à sua constituição, processo de formação, e processos de tratamento mais comuns (Quadro 1). E as propriedades desses tipos de lodo influenciam na eficiência de remoção de DBO e de poluentes biodegradáveis, e no volume de lodo gerado.

O esgoto é uma mistura de sólidos orgânicos e inorgânicos, e a variabilidade da sua composição é muito dinâmica, pode ser influenciada pelas condições socioeconômicas da população e o tipo de efluente enquanto à origem, geralmente doméstico²³ ou industrial. Contém substâncias químicas e agentes patogênicos²⁴, entre outros contaminantes orgânicos e inorgânicos,

²³ constituídos, essencialmente, de despejos domiciliares, provenientes das instalações sanitárias das edificações, como nos centros urbanos não há separação na coleta de esgotos hospitalares e provenientes de setores de serviços.

²⁴ Constituídos por bactérias, protozoários, fungos, vírus, helmintos ou outros organismos capazes de provocar doenças.

representando um risco significativo para o meio ambiente, especialmente se não for tratado e disposto inadequadamente (CHRISTODOULOU STAMATELATOU, 2016).

Quadro 1: Tipologia do lodo de esgoto

Tipologia do lodo	Lodo primário	Lodo secundário
Constituição	Predominantemente matéria inorgânica, contém de 2% a 9% de sólidos, até 99,5% de água	Natureza biológica, com 0,8% a 3,3% de sólidos, formado pelo crescimento de biomassa microbiana
Processo de Formação	Separação de sólidos suspensos e sedimentáveis do esgoto bruto	Na etapa biológica, pelo crescimento da biomassa microbiana resultante da degradação da matéria orgânica
Processos de Tratamento	Flotação, precipitação e sedimentação	Tratamento biológico com biorreatores e filtros

Fonte: Melo e Marques, 2000

A variabilidade do esgoto está relacionada, principalmente, à sua origem, à vazão de esgotos coletada, ao sistema de coleta (separador absoluto ou sistema unitário) (VOLSCHAN, 2009), onde:

- Sistema Unitário²⁵: Usa uma única tubulação para águas residuárias, de infiltração e pluviais, reduzindo custos, mas podendo sobrecarregar durante chuvas intensas.
- Sistema Separador Absoluto²⁶: Utiliza tubulações separadas para águas residuárias e pluviais, permitindo tratamento mais eficiente e evitando sobrecargas em períodos chuvosos.

Cabe destacar que no Brasil apesar de adotar o sistema separador absoluto, o aumento na vazão e variação na qualidade do esgoto durante precipitações em áreas urbanas tem sido caracterizado pelo lançamento clandestino de águas pluviais nas redes coletoras de esgotos. (FESTI, 2005). A maioria das cidades da Europa e da América do Norte construiu suas redes de esgoto em épocas anteriores à invenção do sistema separador. Por esse motivo, esses locais possuem, em grande parte, sistemas unitários (VOLSCHAN, 2009).

²⁵ O sistema unitário com origem em Londres em 1915, é adotado principalmente em países de clima temperado, onde o índice pluviométrico é relativamente baixo, as chuvas são de baixa intensidade, o nível socioeconômico é elevado e as áreas urbanas são amplamente pavimentadas (VOLSCHAN, 2009).

²⁶ O sistema separador absoluto foi concebido e implantado nos Estados Unidos em 1879, visando aspectos práticos e econômicos.

3.3.3. Tratamento de esgoto

No Brasil, os índices de cobertura em termos de coleta e tratamento de esgotos são insuficientes. Segundo o MCID (2023), 56% da população tem acesso à rede de esgoto, e apenas 81,6% do lodo coletado é tratado. Por sua vez, ATLAS ESGOTO, 2017, na área urbana, as redes coletoras de esgotos alcançam 61,4%, porém dessa parcela 42,6% é conduzida a uma estação de tratamento.

Figura 3: Índices de cobertura de esgotos em áreas urbanas do Brasil



Fonte: Atlas Esgoto, 2020

O tratamento de esgotos urbanos visa reduzir substâncias, organismos até nutrientes indesejados, para proteger o meio ambiente e a saúde pública. A seleção dos processos/níveis de tratamento de esgotos está relacionada às características do corpo receptor e da legislação vigente. No entanto, a escolha é condicionada a aspectos econômicos, sociais e operacionais. De forma complementar ao Quadro 1 o Quadro 2 apresenta os níveis de tratamento convencional de esgotos, divididos em níveis preliminar, primário, secundário e terciário.

Quadro 2: Níveis de tratamento de esgotos

Nível	Remoção
Preliminar	Sólidos grosseiros em suspensão (material de maiores dimensões e areia)
	Sólidos suspensos sedimentáveis
Primário	Demanda bioquímica de oxigênio (DBO) particulada (suspensa) (associada à matéria orgânica componente dos sólidos em suspensão sedimentáveis)
Secundário	DBO particulada (suspensa) (associada à matéria orgânica particulada presente no esgoto bruto, ou à matéria orgânica não particulada, não removida no tratamento primário eventualmente existente)
	DBO solúvel (associada à matéria orgânica sob a forma de sólidos dissolvidos)
Terciário	Nutrientes
	Organismos patogênicos
	Componentes não biodegradáveis
	Metais
	Sólidos inorgânicos dissolvidos
	Sólidos suspensos remanescentes

Fonte: Anicio, 2024 (adaptado de Von Sperling)

3.3.4. Lodo

Segundo a Resolução CONAMA nº 498 de 2020, o *lodo de esgoto* é um resíduo sólido gerado no processo de tratamento de esgoto sanitário, por processos de decantação primária, biológico ou químico, não incluindo resíduos sólidos removidos de desarenadores, de gradeamento e peneiramento.

O *lodo de esgoto* ou *lodo* entendido como subproduto no seu estado bruto, é considerado uma parcela sólida proveniente do tratamento do esgoto (CORREA et. all, 2019). É um resíduo rico em matéria orgânica, nutrientes e metais pesados e possui variadas aplicabilidades, evitando assim, o descarte inadequado.

A gestão do lodo varia entre países, influenciado pelos contextos sociais, econômicos, técnicos e legais/normativos específicos (SOUZA, 2022). No Brasil, o gerenciamento adequado dos resíduos inicia-se pela sua classificação ambiental, de acordo com a norma NBR 10.004. Segundo essa norma os resíduos são classificados em: classe I – perigosos; classe II – não perigosos; classe IIA – não inertes; resíduos classe IIB – inertes (ABNT, 2004). O uso e disposição do lodo no solo é determinado pela Resolução CONAMA 498/2020, que estabelece critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos. Entendido como produto do tratamento do lodo de esgoto sanitário que atende aos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos de forma apta para aplicação em solos.

Fajardo (2019) destaca que a gestão do lodos no Brasil, tem sido frequentemente negligenciada, pois raramente os projetos das novas ETEs detalham a forma de gerenciamento e disposição do lodo²⁷. Portanto, a gestão adequada do lodo representa um desafio para os projetistas e operadores dos sistemas, pois a disposição final desse resíduo tornou-se um dos problemas ambientais urbanos mais relevantes da atualidade, não apenas pelos grandes volumes gerados, mas também pela sua composição (FERREIRA, 2015).

De forma geral, a tecnologia de tratamento do lodo deve ser escolhida visando atender às características da ETE, os impactos durante o processo de transformação, os resíduos gerados, e destino final pretendido como recuperador de nutrientes na forma de biossólido. Considerando que cumpra os requisitos de segurança, para minimizar riscos ambientais e de saúde (CHRISTODOULOU; STAMATELATOU, 2016)

²⁷ Refere-se ao destino definitivo do lodo após o tratamento, ou seja, onde ele é depositado ou como é reutilizado

A recuperação de nutrientes do lodo é uma das alternativas mais promissoras a partir da geração de valor pela comercialização de produtos e a diminuição da utilização de fertilizantes sintéticos industriais (TASSINARI et al., 2020).

Segundo Giwa et al. (2023), em termos de bioenergia e remoção de nutrientes, o lodo de esgoto municipal pode passar por métodos referentes às técnicas aplicadas ao lodo para torná-lo mais seguro ou adequado para disposição final, diminuindo seu volume, neutralizando patógenos ou estabilizando componentes.

Esses métodos podem ser classificados em tratamento não térmico e térmico (Quadro 3) cabe destacar que não foi considerado o método de tratamento do lodo por processos biológicos. Os métodos disponíveis para o tratamento do lodo de esgoto são aplicadas considerando os limites sanitários adotados por cada país, que diferem principalmente em relação às restrições de uso e aos parâmetros microbiológicos e inorgânicos. Além disso, visam reduzir o volume do lodo são essenciais, pois está constituído em maioritariamente de água, o que influencia diretamente nos custos de transporte e disposição (LIEW et al., 2004).

Quadro 3: Técnicas aplicadas ao lodo

Metodologia	Disposição final	Parâmetro	Princípios	Desvantagens	Benefícios
Métodos de Tratamento não Térmico para o Lodo	Aterro sanitário	–	Um revestimento inferior, um sistema de coleta de chorume, uma cobertura e o ambiente hidrogeológico natural.	Geração de chorume, desperdício de materiais orgânicos/inorgânicos valiosos, emissão de gases de efeito estufa se não forem projetados	Processo barato, sem consumo de energia, reduz o volume de SS
	Compostagem	55–65 °C	Utilização de microrganismos na decomposição de matéria orgânica	A contaminação por metais pesados emite gases nocivos, como gases de efeito estufa, que levam ao efeito do aquecimento global.	Degradação biológica, geração de macro/micronutrientes, destruição de patógenos, composto pode ser usado na correção do solo
	Estabilização	-	Operado por meio de aeróbica, DA, compostagem e vermiestabilização	Pode ser estressado por muitos fatores, como propriedades fitoquímicas dos resíduos, pH, temperatura, pressão, tempo, etc.	Reduz patógenos, elimina odores ofensivos, melhora a estética e minimiza o potencial de putrefação
	Terras agrícolas (biossólido)	-	Uso direto de SS sem qualquer tratamento	Contaminação de metais pesados	Ótima fonte de substâncias inorgânicas/orgânicas como fertilizante ou para melhorar as propriedades do solo
	Secagem	60–93 °C.	Espalhamento de resíduos/SS em leito aberto de areia e deixados até secar	Dependente do clima, condições de temperatura instáveis, cobrem grande superfície terrestre, emitem odores, poluição por metais pesados	Realizado de forma natural, acessível, destrói patógenos, reduz o volume de lodo
	Desidratação	30–70 °C e 1–300 bar	Minimização do teor de água do SS para seu descarte eficaz	Este processo de tratamento não pode mitigar a poluição de HMs em SS	Melhora a utilização da bioenergia, facilita o transporte, diminui o chorume nos aterros sanitários, não contribui para a emissão de carbono

Métodos de Tratamento do Lodo por Processos Térmicos	Incineração	Temperaturas de 750–925 °C Os tempos de residência são tipicamente de 2–5 s.	Combustão direta em excesso de suprimento de oxigênio	Caro, emite alguns gases poluentes como furanos e nitroso, emissão de amônia, leva à segunda poluição via resíduo (cinzas)	Minimização de odores, redução de massa de resíduos brutos (SS), produção de energia.
	Gaseificação hidrotérmica	360–700 °C e 210–300 bar	Processo térmico para decomposição de biomassa em condições inadequadas de oxigênio para produzir gás de síntese	O gás de síntese produzido possivelmente contém metais pesados tóxicos.	Permite a recuperação de produtos químicos e bioenergia, ótima fonte de gás de síntese de qualidade/quantidade.
	Carbonização hidrotérmica	180–260 °C e 20–100 bar	Processo térmico pela conversão de resíduos orgânicos/biomassa em material rico em carbono	Poluição de metais pesados tóxicos por meio de diferentes aplicações por produto	Gera material rico em carbono (Biochar), influencia a desidratabilidade, hidrofóbico, é uma ótima fonte de combustível sólido
	Liquefação hidrotérmica	280°C-370 °C e 100–250 bar	Conversão termoquímica de biomassa em hidro-óleo	Contaminação de compostos de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e HMs	Produce grande quantidade de hidro-óleo que pode ser usado como combustível.
	Torrefação	>300 °C	Processo térmico baixo/lento em ambiente com falta de oxigênio	Poluição de HMs através de diferentes aplicações de produtos torrefados	Produce grande quantidade de biochar, melhora as propriedades do combustível sólido, baixo consumo de energia, tempo de torrefação curto, melhora a fixação de carbono e a hidrofobicidade do material torrefado
	Pirólise	400–800 °C e 2–9 bar	Degradação térmica sem qualquer fornecimento de oxigênio	Poluição por metais pesados através de diferentes aplicações de seus subprodutos	Gerar bio-óleo, biochar e gás de síntese que podem ser usados como aditivos em outros processos de tratamento e uma boa fonte de eletricidade e combustível
	Oxidação úmida	50–360 °C e 30–250 bar	Oxidação de SS em fase líquida com oxigênio dissolvido em alta temperatura	Convenção parcial de carbono permite a captura de metais pesados em efluentes	A emissão livre de gases nocivos, como nitrogênio e furanos, produz materiais ricos em carbono.

Fonte: Adaptado de Guiwa, 2023.

Dessa forma, a depender da escolha do método mais adequado, a disposição final incluem-se: uso agrícola, reflorestamento e paisagismo, remediação e recuperação de áreas degradadas, uso na indústria de construção, recuperação de energia, produção de material vítreo, adsorventes, bio-óleo à base de lodo e disposição em aterros sanitários.

Essas soluções contribuem para a gestão sustentável de resíduos sólidos e sanitários, ampliando as opções para o uso de energias alternativas e ajudando a reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Cieřlik; řwierczek; Konieczka, 2018; Guerra-Rodríguez et al., 2020).

3.3.5. Biogás

O biogás tem origem em um processo biológico. A matéria orgânica, quando decomposta em meio anaeróbico ocorre em quatro fases (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese), as quais ocorrem paralelamente em um processo de um único estágio originando assim, uma mistura gasosa chamada biogás (PROBIOGAS, 2010).

O biogás é uma mistura gasosa, composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). A proporção de metano no biogás varia conforme o tipo de digestor e o substrato (origem da matéria orgânica), Sendo que a composição do gás é essencialmente determinada pelos substratos e o processo de fermentação. Concentrações de metano superiores a 50% tornam o biogás utilizável para a produção de calor e eletricidade (COLTURATO, 2015; PROBIOGAS, 2010).

Apresenta um poder calorífico de 5.000 a 7.000 kcal/m³, o que o torna uma fonte de energia viável para substituir combustíveis fósseis, podendo ser utilizado como combustível automotivo e para injeção na rede de gás natural. A equivalência com outras formas em relação a 1 m³ de biogás é mostrado na Tabela 1 (OLIVER et al., 2008)

Tabela 1. Relação para 1 litro de biogás com outras fontes de energia

Fonte de energia	Volume / Peso
Álcool	0,79 L
Gás de cozinha	0,45 L
Gasolina	0,61 L
Óleo diesel	0,55 L
Querosene	0,58 L
Lenha	1,5 kg

Fonte: Adaptado de Oliver et al. (2008).

Segundo Guerra (2020), a digestão anaeróbia é um dos processos de estabilização²⁸ de lodo mais difundidos no mercado atual. Esse processo ocorre em ambiente anaeróbio (sem a presença de oxigênio), no reator os microrganismos decompõem a matéria orgânica²⁹ presente no lodo, formando assim o biogás. Cabe destacar que a formação de biossólidos também é resultado deste processo, contribuindo na estabilização da matéria orgânica e redução do volume do lodo (METCALF; EDDY et al., 2014).

Segundo Brasil (2015), o digestor geralmente opera em temperaturas controladas, devido à susceptibilidade dos microrganismos, sendo este o fator físico mais importante para o crescimento microbiano, são diferenciadas as seguintes faixas:

- Faixa psicrófila: menor que 20°C;
- Faixa mesófila: entre 20 e 40°C;
- Faixa termófila: maior que 40°C.

²⁸ Processo de decomposição da matéria orgânica no lodo, reduzindo odores, patógenos e sua atividade biológica, tornando-o seguro para descarte ou reutilização.

²⁹ Cabe destacar que tradicionalmente, a digestão anaeróbia é aplicada ao lodo sedimentado, que contém alta concentração de matéria orgânica e é uma fonte significativa de biogás.

O pH influencia diretamente a atividade enzimática e o ambiente químico onde as bactérias operam, afetando a taxa de crescimento desses microrganismos, principalmente das metanogênicas em condições mesofílicas pois são extremamente sensíveis nas faixas próximas a 28°C e 40°C como apresentado na tabela 2

Tabela 2: Condições de Crescimento de Bactérias Fermentativas e Arqueias Metanogênicas, segundo dados de Brasil (2015)

Microorganismo	Condição	Temperatura Ótima (°C)	Taxa de Crescimento Máxima (%)	Faixa Ótima de pH
Bactérias Fermentativas	Termofílica	50-55	100	5,0 - 6,0 (tolerância até 4,5)
	Mesofílica	30-40	65	
Arqueias Metanogênicas	Termofílica	60	100	6,8 - 7,5
	Mesofílica	32-36	50	

Fonte: Adaptado de Brasil, 2015.

A codigestão anaeróbia é outra forma de recuperação energética, que aprimora a eficiência em relação à digestão anaeróbia convencional. Consiste na adição de resíduos orgânicos externos, como restos de alimentos ou resíduos industriais, ao lodo de esgoto. (VASALLE, 2021). Por sua vez, exige a determinação prévia das proporções adequadas de nutrientes, especialmente no que diz respeito à correta relação C/N (carbono para nitrogênio). Isso minimiza a possibilidade de deficiências nutricionais e previne a inibição do processo de fermentação..(KALEMBA,2020). Essa prática otimiza a produção de biogás, equilibrando os nutrientes no digestor e aumentando o volume de biogás gerado, permitindo que as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) aumentem a eficiência energética e contribuam para a economia circular ao aproveitar resíduos de outras origens (VASALLE, 2021).

Também é possível aplicar a digestão anaeróbia diretamente ao efluente (esgoto sanitário parcialmente tratado) em sistemas como os reatores UASB, antes do descarte final. Nestes reatores, o efluente flui através de uma cama de lodo anaeróbio, onde a matéria orgânica residual é decomposta. Esse processo gera biogás em menor quantidade em comparação à digestão do lodo, já que o efluente geralmente tem uma concentração mais baixa de matéria orgânica. Contudo, mesmo com menor eficiência na produção de biogás, essa abordagem ainda contribui para a recuperação de energia e para a remoção de poluentes antes do descarte do efluente (AMARAL, 2021; SILVA et al., 2018).

3.3.6. Efluente tratado

O efluente tratado é a água residual que passa pelos processos de tratamento em ETEs até atingir um nível de qualidade adequado para reúso. Esse recurso é obtido ao final das fases de tratamento. Especialmente quando submetido a tratamentos avançados, dentro das próprias ETEs (AZEVEDO JUNIOR; SANTOS, 2022).

De acordo com Kalembe (2020), existem dois tipos de reúso de águas residuais: o reúso direto, onde os sistemas de tratamento e recepção são combinados, e o reúso indireto, que envolve o processo de mistura e diluição da água residual recondicionada, antes do uso, em águas superficiais naturais e subterrâneas. As águas residuais tratadas mecanicamente, biologicamente e quimicamente podem conter micropoluentes orgânicos, compostos inorgânicos tóxicos, compostos biogênicos e compostos minerais dissolvidos. Alguns compostos orgânicos e inorgânicos não passam por decomposição biológica, portanto métodos não biológicos são utilizados para a remoção desses compostos.

Segundo a CETESB, a água de reúso é um recurso recuperável, e, portanto, o efluente tratado pode ser empregado para a irrigação de áreas verdes, controle de poeira, lavagem de ruas e descarga de vasos sanitários. Estes usos não potáveis ajudam a reduzir a dependência de fontes de água potável. No setor industrial, o efluente tratado pode ser utilizado como água de processo ou para o resfriamento de equipamentos, contribuindo para a redução do consumo de água bruta. Na agricultura, o efluente tratado é utilizado para irrigação de culturas, proporcionando uma fonte alternativa de água e nutrientes que reduz a demanda por fertilizantes químicos (ALMEIDA, 2010).

Dentro da própria ETE pode ser reutilizado em várias etapas operacionais, como lavagem de filtros, manutenção dos equipamentos e outros processos de lavagem e limpeza, (AZEVEDO JUNIOR; SANTOS, 2022).

4. METODOLOGIA

A pesquisa iniciou-se com uma revisão preliminar da literatura sobre Economia Circular e ETEs, para ambientar a metodologia científica aplicada aos objetivos deste trabalho.

Em seguida, foi adotada a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) como método de pesquisa, para garantir um maior rigor científico na seleção de artigos científicos que seriam estudados. Segundo Barbosa (2019), a RSL é uma modalidade de pesquisa que segue protocolos específicos e busca dar logicidade a um grande corpus documental. Conforme Ramos (2014), visa minimizar o viés, realizando uma coleta exaustiva de textos relevantes ao tema. Para alinhar a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) ao tema da circularidade em ETEs, considerou-se as etapas sugeridas do Quadro 4, para orientar o processo de revisão.

Quadro 4: Etapas para a elaboração da Revisão Sistemática da Literatura.

Etapas	Descrição
1) Definição de Objetivos	<ul style="list-style-type: none">• O que deseja ser pesquisado• Tema• Objetivo da revisão• Como descrever seu objeto de pesquisa com palavras-chaves?
2) Determine um descritor (palavra ou expressão) de busca	a) Teste dos descritores selecionados b) seleção de operadores lógicos (booleanos) c) formação do string : descritor + operador lógico
3) Escolha as bases de dados pertinentes	Seleção da base eletrônica (database) exem: Portal de Periódicos da CAPES
4) Busca Sistemática nas Bases de Dados	Realização de buscas nas bases usando os string selecionados
5) Triagem e Seleção dos Estudos	Uso e aplicação de filtros, exem: periódicos (scopus, Science direct, etc), ano de publicação, revisão e seleção de estudos com base em critérios de inclusão/exclusão.
6) Extração e Síntese dos Dados	Compila e sintetiza dados extraídos dos estudos selecionados.
7) Agrupamento dos Estudos em Categorias	Agrupa resultados com base em temas ou categorias de interesse.
8) Análise da Qualidade Metodológica	Avaliação da metodologia, resumo, dos estudos para verificar validade e relevância.
9) Apresentação dos Resultados	Organiza os achados de forma clara, relacionando com a pergunta inicial.

Fonte: Adaptado de Medeiros, 2015

Como referido no Quadro 4, após definição dos Objetivos gerais e específicos e demais estratégias referentes à RSL, se determinaram os termos de busca. O portal de busca utilizado foi o Portal de Periódicos da CAPES, acessada com uma conta institucional pública de ensino superior.

O Quadro 5 mostra os *string* de busca escolhidos para este trabalho, os operadores booleanos usados para refinar a busca nas bases de dados (*AND* e *OR*), e os três idiomas de busca escolhidos.

Quadro 5: Strings utilizadas para a busca de estudos de caso

Idioma de busca	Strings de busca
Inglês	“circular economy” AND (“sewage treatment” OR “wastewater treatment”)
Português	“economia circular” AND “tratamento de esgoto” OR “tratamento de águas residuárias”
Espanhol	"economía circular" AND "tratamiento de aguas residuales"

Fonte: Autora (2024).

A busca de artigos para a seleção de estudos da RSL foi realizada em 24 de fevereiro de 2022. Para essa pesquisa, foram escolhidas quatro bases de dados amplamente reconhecidas pela comunidade acadêmica já que contam com alto impacto em termos de relevância e qualidade dos periódicos indexados: Web of Science; SciELO; Scopus; e ScienceDirect.

Para a delimitação temporal foram escolhidas as datas de 1º de janeiro de 2018 a 24 de fevereiro de 2022, abrangendo quatro anos de publicações. Essa seleção resultou na coleta de um total de 1.234 artigos publicados nas quatro bases de dados escolhidas.

Continuando com a etapa de triagem, foram adotados critérios adicionais de inclusão e exclusão para garantir que os artigos selecionados cumprissem com os objetivos propostos assim como a sua relevância para a pesquisa. A síntese desses critérios adotados está apresentada no Quadro 6. Para este processo, envolveu uma análise mais detalhada das seções de metodologia, resumo e conclusão dos artigos frente a um grande número de referências coletadas.

Quadro 6: Critérios de inclusão e exclusão da triagem

Critérios de inclusão	Critérios de exclusão
<ul style="list-style-type: none"> Estudos de caso que envolvam práticas de economia circular em ETEs; Estudos aplicados tanto em escala real quanto em escala piloto; Publicações entre 2018 e 2022. 	<ul style="list-style-type: none"> Estudos duplicados ou inacessíveis via Acesso Institucional; Estudos que não abordam diretamente a economia circular aplicada a ETEs; Publicações em línguas que não fossem inglês, português ou espanhol (caso isso tenha sido uma limitação).

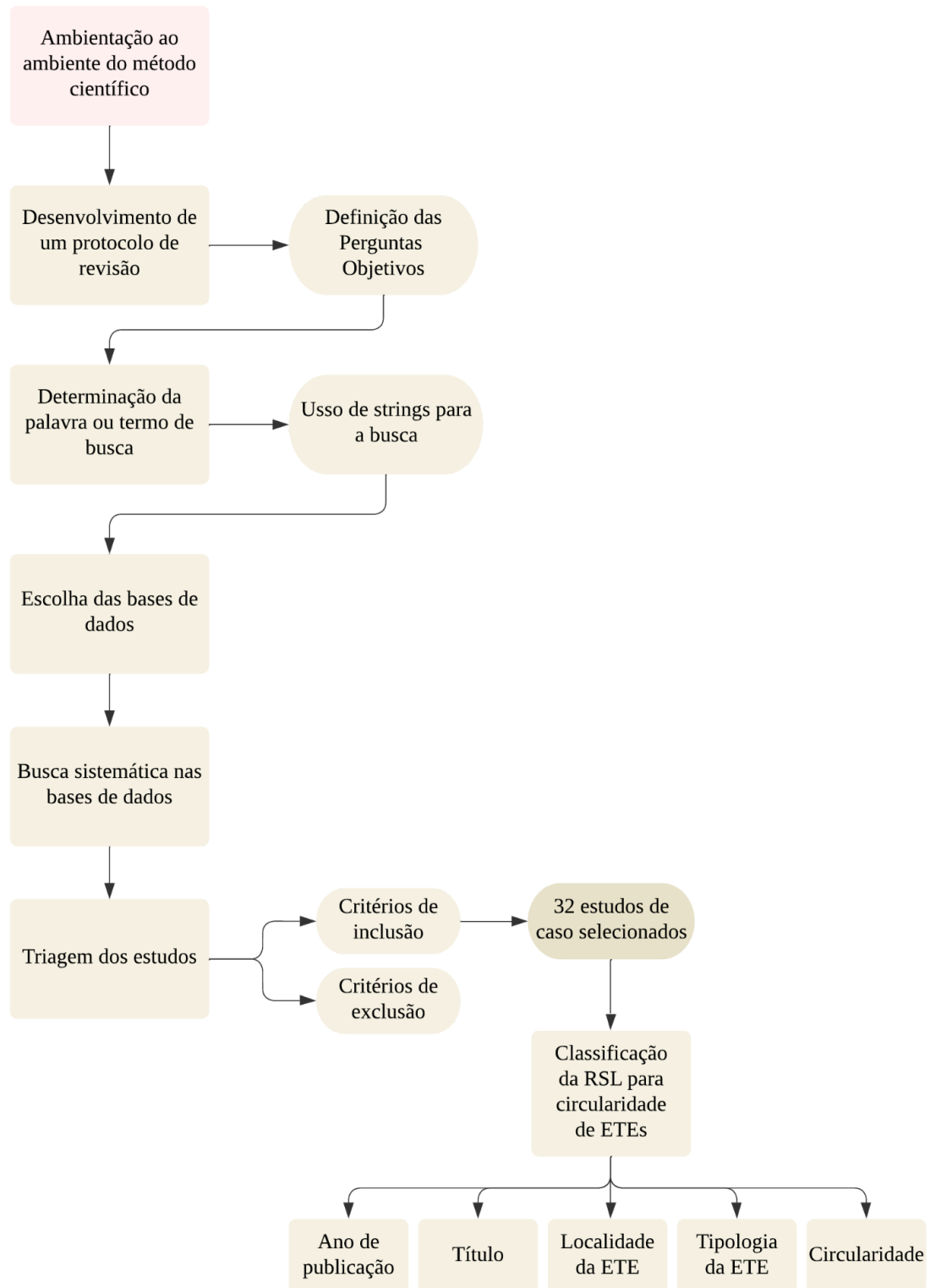
Fonte: Autora (2024).

Após uma avaliação metodológica exploratória dos artigos coletados com base nos critérios de inclusão, foram selecionados 32 artigos cujos estudos de caso abordam modelos e/ou aplicações de processos de circularidade em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), em escala real ou piloto³⁰.

A Figura 4 representa o fluxograma da metodologia empregada neste trabalho, destacando as fases preliminares e o desenvolvimento da Revisão Sistemática da Literatura (RSL), assim como a classificação de circularidade atribuída para a organização das informações encontradas.

³⁰ Por definição, o estudo piloto é um teste, em pequena escala, dos procedimentos, materiais e métodos propostos para determinada pesquisa. Ou seja, é uma mini versão do estudo completo, que envolve a realização de todos os procedimentos previstos na metodologia de modo a possibilitar alteração/melhora dos instrumentos na fase que antecede a investigação em si. (BAILER; TOMITCH; D'ELY, 2011)

Figura 4: Fluxo de Revisão Sistemática da Literatura para Análise de Estudos de Caso de Circularidade em ETES



Fonte: Autora (2024).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado da revisão sistemática da literatura, após a filtragem, realizada de acordo com os critérios de seleção descritos na metodologia deste estudo, foram selecionadas, ao todo, 32 pesquisas provenientes de quatro bases de busca, os quais foram classificadas para sua posterior análise.

Dos estudos de caso escolhidos por meio da RSL, foi elaborado o Quadro 6, a fim de classificar as práticas de circularidade segundo critérios de localidade, porte, tipo de tratamento, estratégia ou prática de circularidade, aspectos legais, regulatórios, ou experimentais (quando disponível), para futura discussão dos resultados.

Quadro 7: Classificação da RSL para circularidade de ETEs

Citação do artigo	Título original do artigo	Título traduzido do artigo (em português)	Localidade da ETE	Tipologia da ETE		Circularidade				
				Porte, vazão tratada ou população atendida	Tipo de tratamento do esgoto	Escala	Recurso recuperado	Tecnologia de tratamento do recurso	Destino do subproduto	Aspectos Legais, regulatórios e outras observações
Maaß e Grundmann (2018) [1]	Governing Transactions and Interdependences between Linked Value Chains in a Circular Economy: The Case of Wastewater Reuse in Braunschweig (Germany)	Governando Transações e Interdependências entre Cadeias de Valor Vinculadas em uma Economia Circular: O caso da reutilização de águas residuais em Braunschweig (Alemanha)	Alemanha (Braunschweig)	Não especificado	Tratamento biológico completo	Real	Biogás (ENERGIA)	Digestão anaeróbia do lodo de esgoto	Bioenergia - Produção de eletricidade que pode ser utilizada dentro da ETE ou externamente.	O documento sugere a análise de custos. Através da metodologia aplicada (entrevista) menciona uma grande viabilidade econômica e ambiental. A cidade possui o própria associação para regulamentar ETEs
							Águas residuárias tratadas (ÁGUA)	Tratamento biológico completo	Irrigação de terras agrícolas em uma área de 2.700 hectares	
							Lodo de esgoto (BIOSSÓLIDO)	Desidratação do lodo durante o inverno e aplicado como fertilizante durante o verão	Como fertilizante aplicado diretamente nas terras agrícolas	
Moraes et al. (2022) [2]	Recovery of nutritional resources of urban sewage sludge in lettuce production	Recuperação de recursos nutricionais de lodo de esgoto urbano na produção de alface	Brasil	900 L/s	Tratamento primário (Reator UASB) secundário (físico-químico) e desinfecção	Real	Lodo de esgoto (BIOSSÓLIDO)	Solarização do lodo - Testagem de diferentes concentrações de biossólido em cultura orgânica.	Biossólido é aplicado no solo para cultivo de alface.	Os padrões por risco de contaminação descritos pela (ANVISA).
Júnior et al. (2021) [3]	Evidences on the application of biosolids and the effects on chemical characteristics in infertile tropical sandy soils	Evidências sobre a aplicação de biossólidos e os efeitos nas características químicas de solos arenosos tropicais inférteis	Brasil (Campo grande)	Não especificado	Tratamento preliminar e Tratamento primário (Reator UASB)	Real	Lodo de esgoto (BIOSSÓLIDO)	Incorporação de biossólidos em solos arenosos tropicais inférteis com uso de aragem	Aplicação de biossólidos em cinco áreas diferentes, de 2012 a 2018.	O estudo apresenta uma análise de análise de poluentes emergentes (EOPs)

Dinova et al., (2018) [4]	FISH analysis of microbial communities in a full-scale technology for biogas production	Análise FISH de comunidades microbianas em tecnologia em escala real para produção de biogás	Bulgária (ETC Kubratovo)	Não especificado	TratameQuadro 7: Classificação da RSL para circularidade de ETEs nto primário e secundário	Real	Biogás (ENERGIA)	Utiliza digestão anaeróbica e a técnica de fluorescência in situ hybridization (FISH) para análise de metanogênicos (Archaea).	recurso energético	O estudo discute a qualidade sazonal do lodo de esgoto, na complexidade do método pelo uso de equipamentos especializados.
Cavieres et al., (2021) [5]	Pilot-scale phytoremediation using Muriellopsis sp. For wastewater reclamation in the Atacama Desert: Microalgae biomass production and pigment recovery	Fitorremediação em escala piloto usando Muriellopsis sp. Para recuperação de águas residuais no deserto de Atacama: produção de biomassa de microalgas e recuperação de pigmentos	Chile	800 L	Tratamento primário e reatores raceway	Piloto	Recuperação de nitrogênio e fósforo (NUTRIENTES)	A fitorremediação com microalgas Muriellopsis sp	A biomassa resultante rica em proteínas e pigmentos	A recuperação de carotenoides e luteína foram produzida sem adição de nutrientes externos
							Águas residuárias tratadas (ÁGUA)		Irrigação.	As análises de água foram baseadas nos parâmetros (NCh. 1333)
Xiong et al., (2018) [6]	Mature landfill leachate treatment by the MBBR inoculated with biocarriers from a municipal wastewater treatment plant	Tratamento de lixiviado de aterro maduro pelo MBBR inoculado com biocarreadores de uma estação de tratamento de águas residuais municipais	China Wuxi ETE Lucum Aterro Nantong	10 L	Tratamento secundário	Piloto	biomassa de microalgas (NUTRIENTES)	Aproveitamento de biocarreadores coletados de uma ETE municipal para remover N de lixiviados de aterros maduros.	Tratamento de lixiviado de aterro sanitário, a fim de metabolizar os contaminantes	Uso de água tratada para irrigação agrícola e uso de lodo como fertilizante para cultivos de alimentos e bioenergia
Škufca et al., (2021) [7]	Phycoremediation of municipal wastewater: Removal of nutrients and contaminants of emerging concern	Fitorremediação de águas residuais municipais: remoção de nutrientes e contaminantes de preocupação emergente	Eslovênia Ajdovščina	3000 L	Tratamento Convencional Primário seguido por tratamento com Lagoas de algas de alta taxa (HRAP)	Piloto	Nitrogênio e fósforo biomassa de microalgas (NUTRIENTES)	Uso de microalgas de lagoas de algas de alta taxa para remoção de nutrientes e contaminantes emergentes.	Biomassa de algas com potencial para produção de biocombustíveis ou fertilizantes.	¼ a ½ do custo do tratamento convencional de lodo ativado

Hagenvoort et al.,(2019) [8]	Reusing treated waste-water from a circular economy perspective-The case of the Real Acequia de Moncada in Valencia (Spain)	Reutilizando a água residual tratada de uma perspectiva da economia circular-o caso da verdadeira Acequia de Moncada em Valência (Espanha)	Espanha Pobla de Farnals	347 L/s	Pré-tratamento, tratamento secundário e terciário	Real	Nutrientes contidos em água residual (NUTRIENTES)	O tratamento terciário permite a retenção de nutrientes	Águas residuais tratadas no sistema de irrigação de 500 hectares de cultivos locais	Autossuficiência energética da planta
Rufi-Salis et al.,(2020) [9]	Can wastewater feed cities? Determining the feasibility and environmental burdens of struvite recovery and reuse for urban regions	Podem as águas residuais alimentar as cidades? Determinar a viabilidade e os encargos ambientais da recuperação e reutilização de estruvita nas regiões urbanas	Espanha Barcelona ETEs (Llobregat e Besós)	58 - 69 L/s	Tratamento primário e secundário	Real	Nutrientes (NUTRIENTES)	Processo de recuperação de fósforo na forma de Fosfato de magnésio amônio (Estruvita) através de tecnologias como REM-NUT,Ostara, AirPrex	Fertilizante mineral em campos agrícolas.	A União Europeia, reconhece ao Fósforo (P) como um recurso crítico e incentiva sua recuperação
López et al.,(2020) [10]	Microbiological quality of sewage sludge after digestion treatment: A pilot scale case of study	Qualidade microbiológica do lodo de esgoto após tratamento de digestão: um caso de estudo em escala piloto	Espanha	Não especificado	Tratamento de digestão anaeróbia e aeróbia em condições mesofílicas e termofílicas.	Piloto	Lodo de esgoto (BIOSSÓLIDO)	Digestores anaeróbios e aeróbios termofílicos autotermiais (ATAD), com parâmetros microbiológicos monitorados para sanitização	Uso agrícola do lodo tratado	Variações nas condições de digestão afetam a eficiência de remoção de microrganismos.
Durán et al.,(2020) [11]	Modeling the anaerobic treatment of sulfate-rich urban wastewater: Application to AnMBR technology	Modelagem do tratamento anaeróbio de águas residuais urbanas ricas em sulfato: Aplicação à tecnologia AnMBR.	Espanha valencia ETE Barranco del Carraixet	Não especificado	Digestão anaeróbia combinada AnMBR (Reator Anaeróbio de Membrana)	Piloto	Biogás (ENERGIA)	Reator anaeróbio de membrana (AnMBR) através das etapas de acidogênese, acetogênese e metanogênese	biogás utilizada na própria planta.	Concentrações de H ₂ S, pode exigir dessulfurização antes da valorização energética
							Nutrientes (NUTRIENTES)	O tratamento com AnMBR retém nutrientes no efluente	fertilizante para solo agrícola	

Ferreiro et al. (2021) [12]	Water Reuse Study from Urban WWTPs via c-Ultrafiltration and Ozonation Technologies: Basis for Resilient Cities and Agriculture	Estudo de Reuso de Água a partir de ETEs Urbanas por meio de Tecnologias de Ultrafiltração Contínua e Ozonização: Base para Cidades e Agricultura Resilientes.	Espanha Bilbao ETE Galindo	ETE atende 1.200.000 habitantes,	Tratamento secundário seguido de ultrafiltração contínua (c-UF) e ozonização	Piloto	Águas Residuárias (ÁGUA)	Sistema de ultrafiltração contínua com capacidade de autolimpeza acoplado a um processo de ozonização.	Sistema de ultrafiltração contínua com capacidade de autolimpeza acoplado a um processo de ozonização.	Em conformidade com o Regulamento Europeu 2020/741
Peltola et al. (2021) [13]	An advanced process for thermal treatment of municipal sewage sludge	Um processo avançado para tratamento térmico de lodo de esgoto municipal	Finlândia Rovaniemi	10.000 toneladas por ano	Tratamento primário e secundário	Real	Lodo de esgoto (ENERGIA, NUTRIENTES)	Secagem e combustão térmica (incineração) do lodo e combustão em leito fluidizado circulante	Uso de cinzas como fertilizantes e calor gerado é aproveitado para aquecimento distrital da combustão de lodo	-
Rossi (2018)[14]	RAVITA Technology - new innovation for combined phosphorus and nitrogen recovery	Ravita Technology - Nova inovação para recuperação combinada de fósforo e nitrogênio	Finlândia	1.000 (população equivalente)	Tratamento primário e convencional	Piloto	Lodo de esgoto (NUTRIENTES)	Recuperação avançada de fósforo e nitrogênio do lodo de esgoto através do processo RAVITA para produção de ácido fosfórico e fosfato de amônio	Separação de sais metálicos e P.	A autoridade de Serviços Ambientais da Região de Helsinque desenvolveu os primeiros testes RAVITA
Bezirgiannidis et al. (2020) [15]	Renewable energy recovery from sewage sludge derived from chemically enhanced precipitation	Recuperação de energia renovável de lodo de esgoto derivado de precipitação quimicamente aprimorada	Grécia Xanthi	Não Informado	tratamento terciário avançado	Real	(ENERGIA, NUTRIENTES)	Desempenho de um Reator Tanque de Agitação Contínua anaeróbica para digestão de lodo de esgoto de uma unidade de Tratamento Primário Quimicamente Melhorado.	biogás usado como energia térmica e elétrica, Fertilizante na agricultura.	A necessidade de controle de metais pesados na água residuária, devido ao risco de contaminação da biomassa.

Sharma et al.,(2021) [16]	Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production	Fertilização na economia circular: Biomassa algal fitorremediada como biofertilizantes para produção agrícola sustentável	Índia Nova Delhi	5000 L	Não informado	Piloto	Lodo de esgoto (NUTRIENTES)	Remediação de efluentes à base de microalgas Chlorella	Remoção de contaminantes do esgoto, fertilizante para culturas como espinafre e milho.	Destaca a vantagem ambiental e econômica da abordagem, que alinha a remediação de águas residuais com a produção agrícola sustentável.
--------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------	--------	---------------	--------	-----------------------------	--------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Mancini et al.,(2021) [17]	A water-waste-energy nexus approach to bridge the sustainability gap in landfill-based waste management regions	Uma abordagem denexo água-resíduos-energia para preencher a lacuna de sustentabilidade em regiões com gestão de resíduos baseada em aterros.	Itália Catania, Sicília	545.000 habitantes 2 milhões de habitantes	Lodo ativado Plug-flow, decantação primária, decantação secundária, digestão anaeróbia	Real	BIOGÁS	Digestão Anaeróbia (Reatores CSTR):	Uso de biogás como energia e biometano para transporte	Destaca a criação de um sistema mais circular ao integrar a gestão de resíduos, esgoto e energia, reduzindo a dependência de aterros
							NUTRIENTES	Digestão anaeróbia de lodo, integração com plantas de Waste-to-Energy (WtE).	cinzas ricas em fósforo utilizadas na indústria de fertilizantes.	
							Água para reúso (ÁGUA)	Utiliza-se eletricidade da planta Waste-to-Energy (WtE) para operar sistemas de tratamento terciário	irrigação agrícola e sistemas de manejo hídrico em áreas próximas,	
Di Capua et al.(2021) [18]	Air side-stream ammonia stripping in a thin film evaporator coupled to high-solid anaerobic digestion of sewage sludge: Process performance and interactions	Remoção de amônia em fluxo lateral com ar em um evaporador de filme fino acoplado à digestão anaeróbia de alta densidade de sólidos de lodo de esgoto: desempenho do processo e interações.	Itália (Lombardia)	120 kt por ano	Digestão anaeróbia	Real	Amônia, convertida em sulfato de amônio (NUTRIENTES)	Remoção de amônia em fluxo lateral de ar em um evaporador de filme fino.	Fertilizante na forma de amônio	Trabalho foi apoiado pela UE através do Programa de Pesquisa e Inovação Horizonte - 2020. O lodo de esgoto desidratado é coletado de várias ETES.

Collivignarelli et al.,(2021) [19]	Strong minimization of biological sludge production and enhancement of phosphorus bioavailability with a thermophilic biological fluidized bed reactor	Forte minimização da produção biológica de lodo e aprimoramento da biodisponibilidade de fósforo com um reator de leito fluidizado biológico termofílico	Itália (Lombardia)	130.000 habitantes	Sistema convencional de lodo ativados	Piloto	Fósforo e lodo biológico de alta qualidade (NUTRIENTES)	Uso do reator biológico de leito fluidizado termofílico (TBFBR) para redução do volume de lodo produzido.	Uso agrícola, como fertilizante de alta qualidade	A legislação da região de Lombardia é uma das mais rigorosas para o reaproveitamento de lodo de esgoto biológico no contexto europeu.
Mannina et al.,(2021) [20]	Water Resource Recovery Facilities (WRRFs): The Case Study of Palermo University (Italy)	Estações de Recuperação de Recursos Hídricos (WRRFs): Estudo de Caso da Universidade de Palermo	Itália (Palermo)	Nao especificado	Tratamento convencional de lodos ativados (NEREDA)	Piloto	ÁGUA	Oxi-decantação-anóxico/anaeróbico.	irrigação de áreas verdes	Alinhado com o projeto Horizon 2020 da União Europeia para promover EC
							Nitrogênio e fósforo e biopolímeros -PHA (NUTRIENTES)	Compostagem e secagem.	uso como fertilizante	
Reddy et al.,(2019) [21]	Bacterial conversion of waste into polyhydroxybutyrate (PHB): A new approach of bio-circular economy for treating waste and energy generation	Conversão bacteriana de resíduos em polihidroxibutirato (PHB): uma nova abordagem de economia bio-circular para tratamento de resíduos e geração de energia.	Japão (Muran e Date)	Nao especificado	Lodos ativados	Piloto.	Polihidroxibutirato (PHB) como bioplástico (RECURSOS)	Utilização de culturas bacterianas Bacillus sp. e Cupriavidus sp. para tratamento de efluentes e produção de PHB.	substituição a plásticos convencionais	Redução de lodo usando microrganismos.
Shilton (2018) [22]	Phosphorus removal by an 'active' slag filter—a decade of full scale experience	Remoção de fósforo por um filtro de escória 'ativo' – uma década de experiência em escala real	Nova Zelândia (Waiuku)	6.000 habitantes; 2.000 m³/dia (23,15 l/s.)	Lodo ativados, sistemas de lagoas e zonas úmidas	Real	Recuperação de fósforo (NUTRIENTE)	Remoção de fósforo por filtros ativos de escória com alta porosidade e área superficial	Fósforo retido no filtro	O filtro perde eficiência após cerca de cinco anos devido à saturação da capacidade de retenção de fósforo da escória

Zhou et al.,(2019) [23]	A circular economy use of recovered sludge cellulose in wood plastic composite production: Recycling and eco- efficiency assessment	Uso de celulose recuperada de lodo na produção de compósitos de plástico e madeira: avaliação de reciclagem e ecoeficiência.	Países baixos (Geestmerambacht)	Grande	Tratamento primário	Real	Lodo de esgoto (RECURSOS)	Sistema de filtragem de celulose	Produção de compósitos para materiais de construção, oferecendo uma alternativa sustentável à madeira.	Apoiado pelo projeto SMART-Plant.
Piekutin et al.,(2021) [24]	The Efficiency of the Biogas Plant Operation Depending on the Substrate Used	A eficiência da operação de usinas de biogás dependendo do substrato utilizado.	Polônia (Nordeste)	Nao especificado	Anaerobia	Real	Biogás (ENERGIA)	Digestor de metano	Geração de energia elétrica e térmica digestato	Apoio à economia circular e à redução de emissões de metano no setor agrícola
Czuba et al.,(2021) [25]	Towards the circular economy — A pilot- scale membrane technology for the recovery of water and nutrients from secondary effluent	Em direção à economia circular: tecnologia de membrana em escala piloto para recuperação de água e nutrientes de efluente secundário	Polônia (ETE Wroclaw)	140.000 m³/dia (1620 L/s)	Tratamento mecânico e biológico	Piloto	Águas residuárias (AGUA)	Processo de membranas em três estágios (MF/UF, NF, RO) (micro/ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa)	resfriamento industrial, irrigação	O processo demandando processos de limpeza frequentes.
							Nitrogênio e fósforo (NUTRIENTES)	Retencao de nutriente pelo uso de membranas	Alternativas de uso: na própria ETE, irrigação, recarga artificial de águas subterrâneas, indústria.	
Sakiewicz et al.,(2020) [26]	Innovative artificial neural network approach for integrated biogas - wastewater treatment system modelling: Effect of plant operating parameters on process intensification	Abordagem inovadora de rede neural artificial para modelagem integrada de sistema de biogás e tratamento de esgoto: Efeito dos parâmetros operacionais da planta na intensificação do processo.	Polônia (Rybnik)	27.000 m³/dia	Digestão anaeróbia integrada ao tratamento mecânico-biológico o decantação preliminar, lodos ativos (sistema BIODENIPHO).	Real	Melhora da eficiencia de biogás (ENERGIA)	Digestores anaeróbios (SCFC) com controle otimizado por modelo de rede neural artificial (ferramenta computacional)	Geração de energia elétrica e térmica em sistema de cogeração; aquecimento local redistribuído.	O estudo em questão desenvolve modelos de integração e previsão e otimização de uma planta de biogás em uma infraestrutura de tratamento de águas residuais, assim como uma modelagem numérica

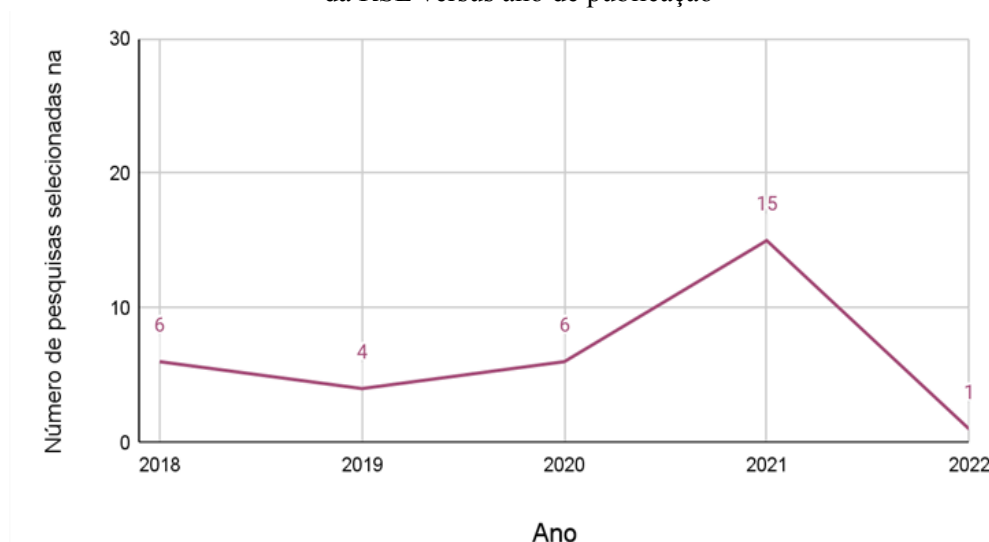
Oliveira et al., (2020) [27]	Variability in the composition of extracellular polymeric substances from a full-scale aerobic granular sludge reactor treating urban wastewater	Variabilidade na composição de substâncias poliméricas extracelulares de um reator de lodo granular aeróbio em escala real tratando esgoto urbano	Portugal (Frielas)	55.000 a 60.000 m³/dia (637 - 694 L/s)	Tratamento convencional de lodos ativados (NEREDA)	Real	Lodo (BIOMASSA, RECURSOS)	Substâncias poliméricas extracelulares (EPS) de lodo granular	Extração de EPS por métodos alcalinos e ácidos, resultando em duas frações: Na-EPS e H-EPS. (obtenção de produtos de base biológica de alto valor a partir da biomassa excedente)	Potencial aplicação na construção civil e agricultura, além de uso em floculantes e materiais de revestimento
Santos et al., (2021) [28]	Beneficial use of lime mud from kraft pulp industry for drying and microbiological decontamination of sewage sludge	Uso benéfico de lama de cal da indústria de celulose kraft para secagem e descontaminação microbiológica de lodo de esgoto	Portugal	140000 habitantes	Digestão anaeróbia e desidratação por centrifugação.	Piloto	Lodo (BIOSSOLIDOS)	Secagem térmica com adição de lama de cal (LM) e lama de cal calcinada (CLM).	Uso agrícola (condicionador de solo, melhorador de pH e fornecedor de matéria orgânica e nutrientes).	A Diretiva 86/278/EEC, implementada há mais de 30 anos, busca incentivar o uso de lodo de esgoto na agricultura.
Cocârță et al., (2021) [29]	Biodegradable Waste Treatment: Sewage Sludge Composting - A Case Study	Tratamento de Resíduos Biodegradáveis: Compostagem de Lodo de Esgoto – Um Estudo de Caso.	Romênia (Galati)	Não especificado	Digestão aeróbia, com um sistema de aeração forçada	Piloto	Composto orgânico (BIOMASSA)	Compostagem em unidade fechada com membrana semipermeável e ventilação forçada	Redução do lodo em forma de composto aplicado em áreas agrícolas	Atende aos padrões de compostagem da Lei 181/2020 da Romênia
Ammenberg et al., 2018) [30]	Biogas in the transport sector-actor and policy analysis focusing on the demand side in the Stockholm region	Biogás no setor de transporte e análise de políticas com foco no lado da demanda na região de Estocolmo	Suécia (Henriksdal e Kåppala.)	932.000 habitantes	lodo ativado	Real	Biogás (ENERGIA)	Purificação e upgrade do biogás para combustível de veículos.	Uso do biogás como gás veicular (Abastecimento de cerca de 330 ônibus do transporte público e táxis)	Suporte da administração regional e municipal; incentivos regulatórios e política

Lage et al. (2021) [31]	Microalgal growth, nitrogen uptake and storage, and dissolved oxygen production in a polyculture based-open pond fed with municipal wastewater in northern Sweden	Crescimento de microalgas, absorção e armazenamento de nitrogênio e produção de oxigênio dissolvido em uma lagoa aberta com policultivo alimentada com esgoto municipal no norte da Suécia.	Suécia	Nao especificado	tratamento secundário Lagoa aberta (raceway pond)	Piloto	Nitrogênio e fósforo e oxigênio dissolvido, com produção de biomassa microalgal. (BIOSSOLIDOS, NUTRIENTES)	Sistema de lagoa aberta policultivo de microalgas, com absorção de nutrientes diretamente do esgoto municipal.	Biomassa de microalgas potencialmente utilizável em biocombustíveis ou fertilizantes.	Sensibilidade às condições climáticas, como baixa temperatura, que pode reduzir a eficiência da absorção de nutrientes e a produtividade da biomassa.
Chang et al. (2019) [32]	A Case Study on the Electricity Generation Using a Micro Gas Turbine	Um estudo de caso sobre a geração de eletricidade usando uma microturbina a gás alimentada por biogás de uma estação de tratamento de esgoto.	Taiwan (Nova Taipei)	1.320.000 m³/dia. (15278 L/s)	Tratamento primário com digestão anaeróbia	Real	Biogás utilizado para geração de eletricidade e calor. (ENERGIA)	Microturbina modelo CR-30 para geração de eletricidade.	Uso interno para a operação da estação, e calor residual é usado no aquecimento dos digestores e torres de dessulfurização	Uma parte significativa do biogás ainda é queimada em flare devido ao excesso de produção, limitando o aproveitamento.

Fonte: Autora, 2024

A RSL realizada em 24 de fevereiro de 2022, considerou estudos publicados a partir de 1º de janeiro de 2018 até 24 de fevereiro de 2022, o mencionado período de análise permitiu identificar um pico de publicações sobre a aplicabilidade de Economia Circular em ETEs no ano de 2021, como mostrado na Figura 5. Cabe destacar que não foram analisados estudos posteriores ao mês de fevereiro de 2022. Portanto o intuito da Figura 5, é representar um aumento comparativo a anos anteriores. Como hipótese, esse aumento pode ser reflexo de uma tendência geral de crescimento no número de publicações científicas, além de indicar um interesse crescente na aplicação de conceitos de Economia Circular em ETEs.

Figura 5: Número de pesquisas selecionadas em escala real e piloto da RSL versus ano de publicação



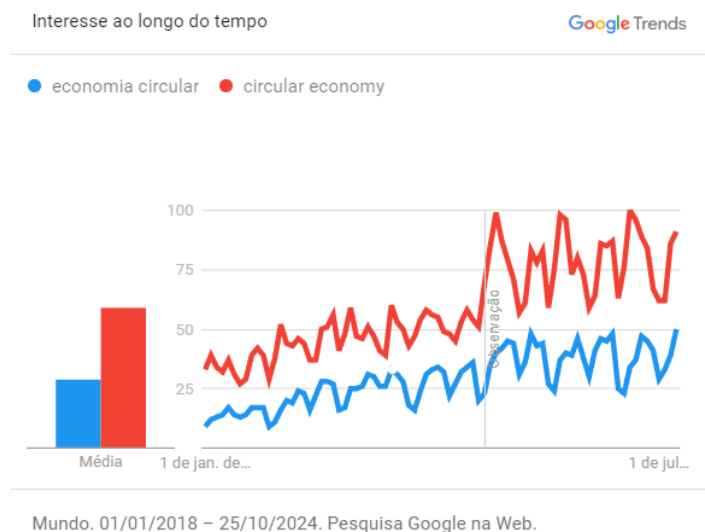
Fonte: Autora (2024).

Segundo Kirchherr et al. (2023), na última década o uso do conceito de economia circular por acadêmicos e profissionais cresceu de forma constante, e, nos últimos cinco anos, o conceito passou por um processo de consolidação e diferenciação.

A análise do Google Trends³¹ (2024) corrobora a observação apontada por Kirchherr, e de forma complementar à Figura 5, ao mostrar que há maior interesse na busca dos termos 'economia circular' e 'circular economy' e que continuou em ascensão após 2022 (data limite da escolha de artigos para RSL), o que reflete a crescente relevância do tema em escala global (ver Figura 6).

³¹ Observação: O Google Trends, embora não seja um método científico formal, é uma ferramenta que permite monitorar o interesse em determinados temas ao longo do tempo, com base nas buscas feitas por usuários.

Figura 6: Evolução do Interesse Global pelos Termos 'Economia Circular' e 'Circular Economy' no Google Trends entre os anos 2018 e 2024



Fonte: Google Trends (2024)

Enquanto o interesse pelos termos relacionados à Economia Circular cresceu de forma contínua (Figura 6), os termos relacionados ao tratamento de esgoto permaneceram estáveis (Figura 7), especialmente em contextos regionais como Brasil e América Latina (dado ao uso dos termos de busca em idiomas espanhol e português), em comparação ao termos de busca em inglês. Isso destaca a importância de promover as temáticas de interesse voltadas ao tratamento de esgoto de forma integrada, incentivando sua circularidade e desenvolvimento de pesquisas científicas na área, e interesse dos usuários que buscam se especializar no tema.

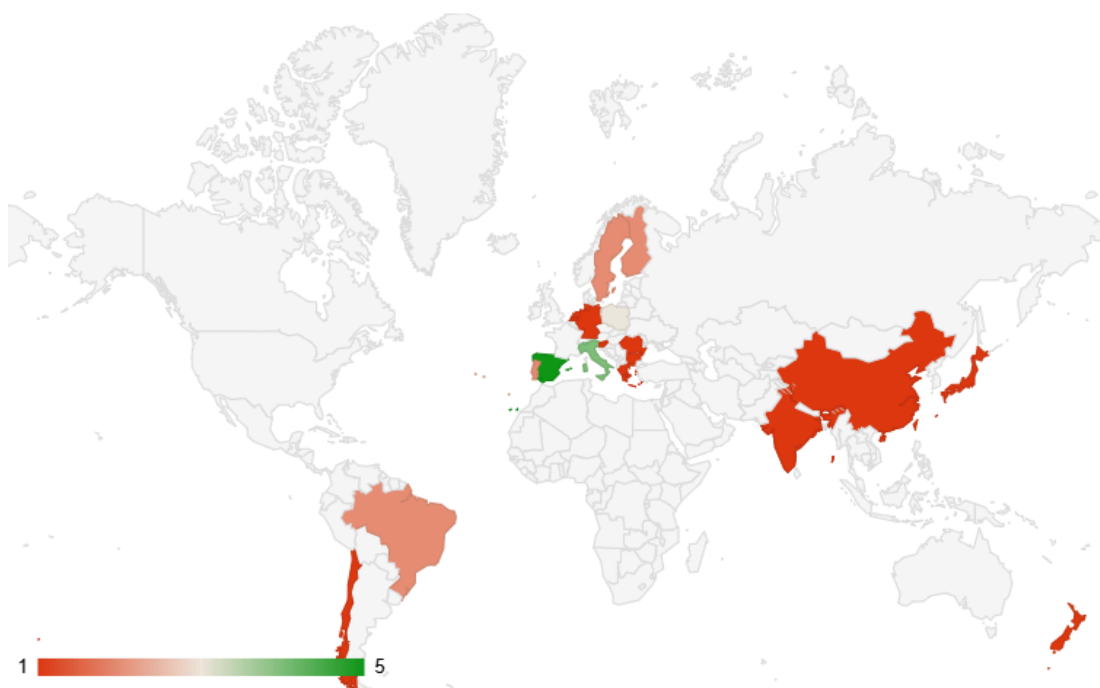
Figura 7: Evolução do Interesse Global pelos Termos Relacionados ao Tratamento de Esgoto entre os anos (2018-2024)



Fonte: Google Trends (2024).

Em relação aos 32 estudos de caso selecionados, através da RSL para esta pesquisa, podemos observar que os países com mais práticas de circularidade em escala real e piloto em ETEs, estão localizados na sua maioria na Europa, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8: Mapa de localização dos estudos de caso selecionados de ETEs com práticas de circularidade em escala real e piloto.



Fonte: Autora (2024).

Pela Figura 8 e tabela 3, observa-se que a Espanha é o país com o maior número de estudos relacionados a ETEs e economia circular, totalizando 5 estudos. A Itália e a Polônia seguem com 4 e 3 estudos, respectivamente, cujos projetos para recuperação de recursos estão sendo aplicados ou desenvolvidos em escala piloto e real. Essa concentração de estudos na Europa pode indicar um maior investimento em tecnologias de economia circular aplicadas ao setor de saneamento. Cabe mencionar que não foram encontrados/selecionados estudos do norte de América, portanto para futuras pesquisas é importante revisar os critérios de seleção de artigos e os termos de pesquisa utilizados, a fim de verificar se há uma lacuna na literatura científica ou uma ausência de publicações.

Tabela 3: Número de artigos selecionados por país de origem

Continente	País	Nº de Pesquisas selecionadas
Europa	Alemanha	1
	Bulgária	1
	Eslovênia	1
	Espanha	5
	Finlândia	2
	Grécia	1
	Itália	4
	Polônia	3
	Portugal	2
	Romênia	1
	Suécia	2
	Países Baixos	1
América	Brasil	2
	Chile	1
Ásia	China	1
	Índia	1
	Japão	1
	Taiwan	1
Oceania	Nova Zelândia	1

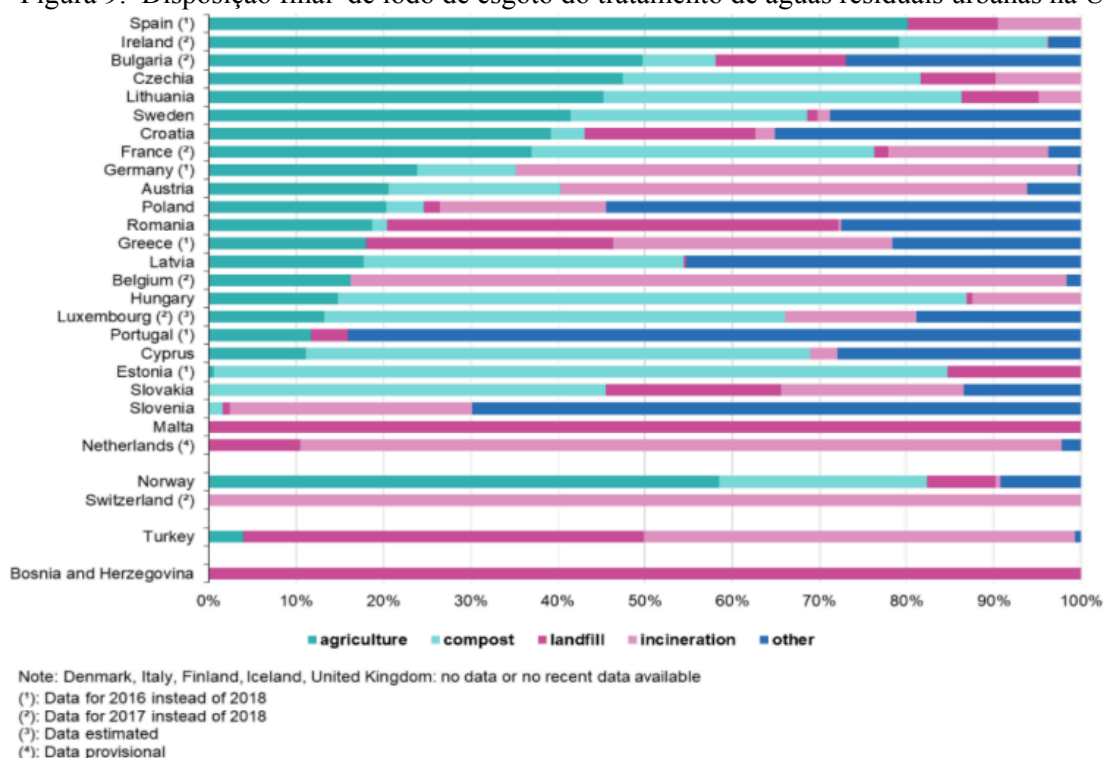
Fonte: Autora (2024).

Dado o número significativo de estudos sobre aplicações de economia circular encontrados na Europa, podemos destacar que, conforme apontado por Smol, Adam e Preisner (2020), os países europeus têm desenvolvido planos de ação que promovem a EC como um objetivo prioritário. Esse avanço é impulsionado por auxílios econômicos, regulamentações rigorosas a fim recuperação de recursos hídricos por meio de ETEs com práticas sustentáveis (EUROPEAN COMMISSION, 2015). Ou planos de ação mais recentes como a *New Circular Economy Action Plan*, lançado pela Comissão Europeia em março de 2020.

Essas medidas têm incentivado as nações da UE a adotar práticas mais sustentáveis. Além disso, a escassez de água está se tornando um problema crescente na Europa, em um contexto de maior risco de secas devido às mudanças climáticas. Países como a Grécia, Portugal e Espanha já registraram secas graves durante os meses de verão, o que intensifica a necessidade de soluções sustentáveis. Espanha e Portugal, por exemplo, buscam reduzir sua dependência de hidrocarbonetos como fonte de energia, especialmente em meio aos conflitos bélicos atuais (SCHAUENBERG; CHRISTOFARO, 2022).

Dados da Eurostat³² (Figura 9) mostra a disposição final do lodo de esgoto em estações municipais de tratamento de águas residuais na União Europeia (UE). Em muitos países, predomina a aplicação direta em terras agrícolas, e a sua aplicação frequente combinada com a compostagem. A Irlanda lidera a disposição de lodo para fins cultiváveis, por sua vez na Espanha lidera o uso do lodo é destinado para a agricultura. Em contraste, a disposição em aterros sanitários é predominante em países como Malta, Bósnia e Turquia. Já na Suíça 100% do lodo é incinerado.

Figura 9: Disposição final de lodo de esgoto do tratamento de águas residuais urbanas na UE



Fonte: Eurostat, 2022

Segundo Roig et al. (2012), a aplicação de lodo de esgoto em solo agrícola na Espanha teve um aumento significativo, apontando que, no período de 1999–2005, cerca de 65% do lodo de esgoto era reciclado em solos agrícolas. Em comparação, ao dado atual da Eurostat o qual mostra um aumento para aproximadamente 80%. De acordo com Collivignarelli et al. (2019), a baixa disponibilidade de solos para a distribuição de biossólidos levou os países como Holanda e Alemanha a escolherem a incineração como a principal rota de recuperação, nos Estados Unidos e China predomina a disposição de terras.

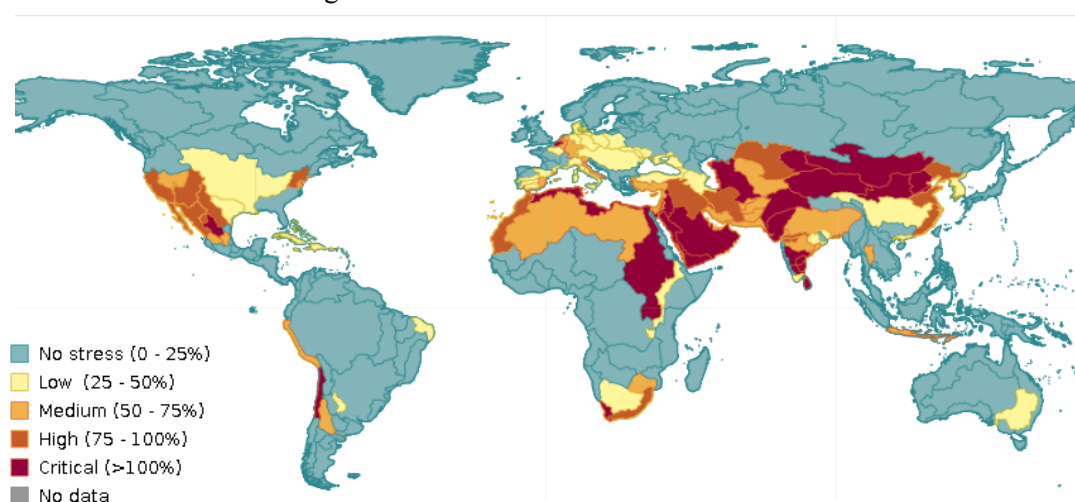
No Brasil a principal destinação do lodo gerado nas ETEs (com e sem tratamento) tem

³² Agência de estatísticas da União Europeia. Sua principal função é fornecer dados estatísticos oficiais sobre os Estados-membros da UE, permitindo comparações e análises em nível europeu.

sido o aterro sanitário, seguido por terrenos baldios ou lixões, sendo pouco predominante seu uso na agricultura e construção civil (PEREIRA, 2022). Segundo Batista (2015) tal destinação é feita por codisposição com lixo urbano.

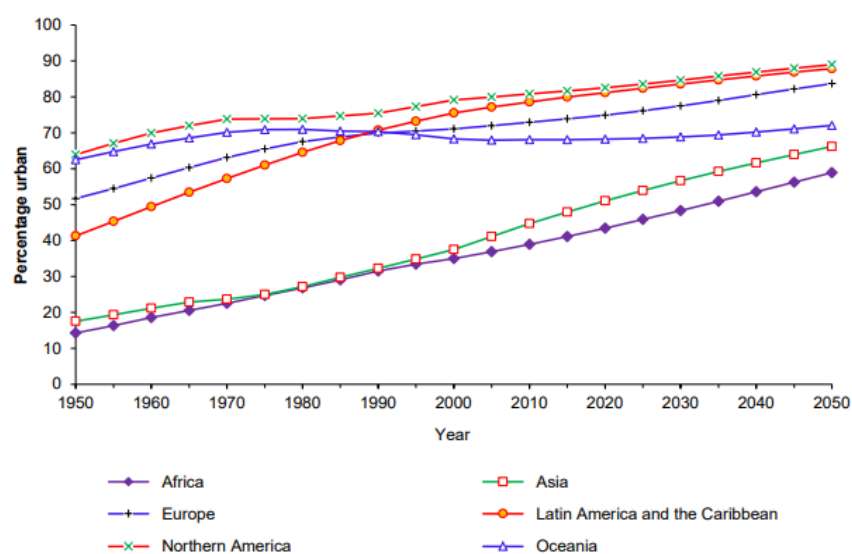
Neste cenário, como apontado no ODS 6. O assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento, frente ao crescente estresse hídrico que afeta a mais de 2 bilhões de pessoas (Figura 10), e a crescente tendência de urbanização que se intensificou nas últimas décadas (Figura 11), como consequência do aumento populacional, tem sido uma motivação recorrente para a maioria dos autores dos 32 estudos de caso selecionados.

Figura 10: Níveis de estresse hídrico físico



Fonte: FAO- Aquamaps, 2024

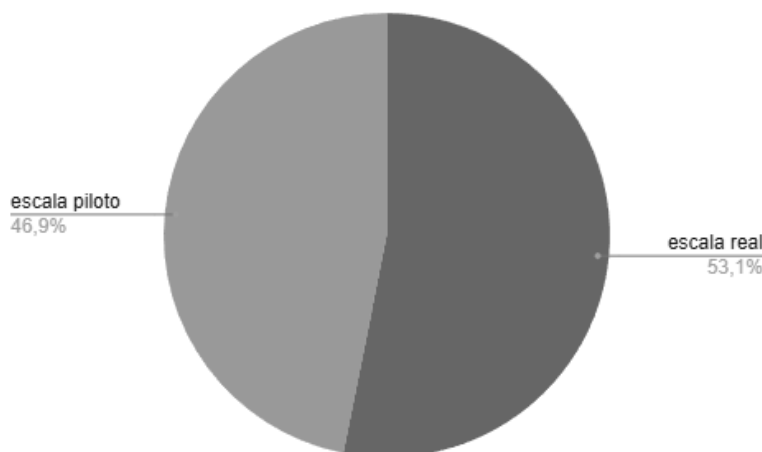
Figura 11: Proporção da população total que reside em áreas urbanas no mundo e nas diferentes regiões geográficas, 1980-2050



Fonte: UN-Department of Economic and Social Affairs, 2019

Como resultado da avaliação dos artigos selecionados apresentados no Quadro 4 deste documento. Podemos observar na Figura 12 , que de acordo com a tipologia, a maioria dos estudos foram realizados avaliando ETEs em escala real.

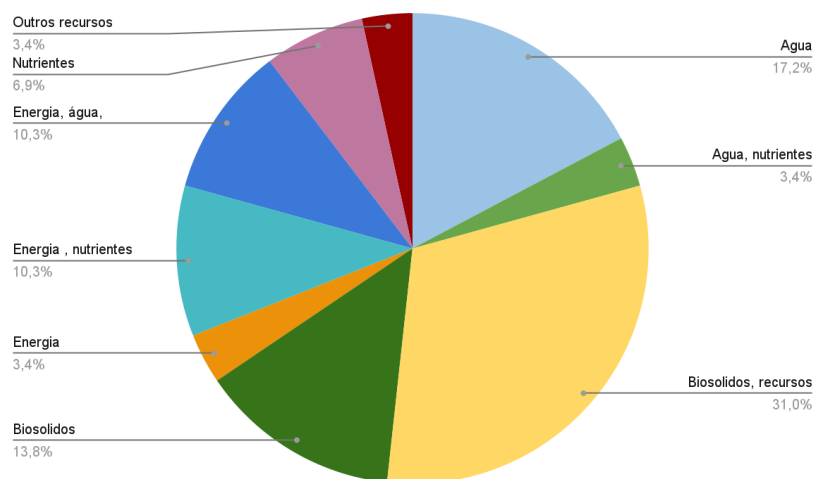
Figura 12: Tipologia da aplicação da estratégia de aplicação de Economia Circular na ETE segundo a escala



Fonte: Autora, 2024.

Referente aos principais recursos recuperados nas ETEs analisadas, observa-se que a maioria das pesquisas selecionadas focam na recuperação de lodo, na forma de biossólido ou composto, correspondendo a 13% dos estudos. Além disso, 31% das pesquisas envolvem a recuperação da biomassa em conjunto com outros recursos, totalizando ao redor de 45 % dos estudos que tratam diretamente do aproveitamento de lodo. Adicionalmente, a recuperação de água representa 27 % dos estudos de caso (Figura 13)

Figura 13: Percentual de pesquisas encontradas, referente ao recurso aproveitado.



Fonte: Autora (2024).

A análise dos 32 estudos selecionados para esta pesquisa permitiu identificar diferentes abordagens para a recuperação de recursos em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), evidenciando práticas que seguem os princípios da economia circular (EC). Os resultados apontam que a recuperação de lodo, biogás e efluente tratado são as principais áreas de estudo, refletindo tanto as potencialidades quanto os desafios para transformar subprodutos em recursos valiosos. Esses elementos desempenham um papel crucial na valorização dos resíduos gerados nas ETEs, sendo fundamentais para uma transição sustentável.

O lodo de esgoto é um dos subprodutos mais abundantes nas ETEs, com potencial para aproveitamento agrícola e produção de energia. Estudos destacam o uso do lodo como biossólido rico em nutrientes para solos, mas apontam a necessidade de análises mais rigorosas dada a presença de contaminantes microbiológicos e de poluentes emergentes, como microplásticos ou resíduos farmacêuticos, que podem comprometer a segurança desse uso quando usado para fins agrícolas ou de compostagem. Os contaminantes são um obstáculo significativo para a circularidade do lodo, portanto processos adicionais como a sanitização com cal e monitoramento por sistemas modernos e computadorizado são sugeridos. Cabe destacar que quando houve aplicação de consórcios microbianos ou microalgas no tratamento do esgoto, os autores mencionaram atenção às condições climáticas dada a sensibilidade destes frente ao frio ou calor, podendo reduzir a eficiência do tratamento. Com isso a valorização do lodo como biossólido representa uma alternativa econômica e ambientalmente vantajosa, embora, a disposição em aterros ainda seja um dos mais predominantes ao redor do mundo.

No Brasil, mesmo com uma área significativamente grande para cultivos e potencial agrícola, ainda carece da necessidade de avanços regulatórios e incentivos, assim como maior atenção à regulação de poluentes nocivos à saúde, como mencionado no estudo onde cita que a Resolução CONAMA nº 498/2020 não estabelece critérios para ou diretrizes para análise de poluentes emergentes. Portanto pelo fato do lodo ser uma das maiores problemáticas em questões de custos de transporte e disposição em aterros sanitários onde os custos variam entre R\$ 60,00 e R\$ 80,00 por tonelada de lodo desidratado (JANUÁRIO; FERREIRA FILHO, 2007), deve uma maior atenção à regulamentação e aproveitamento como recurso para áreas agrícolas, ou potencial fonte de recursos que podem ser usados na construção civil, entre outras aplicações.

Para compreender melhor as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças envolvidas na gestão do lodo nas ETEs, foi elaborada uma matriz SWOT específica, que destaca os principais fatores que influenciam a tomada de decisões sobre o manejo e aproveitamento. A

matriz permite auxiliar as estratégias que favorecem a implementação de uma abordagem circular em ETEs, no contexto dos estudos analisados nesta pesquisa referente ao lodo.

Figura 14: Matriz SWOT para o Manejo e Valorização do Lodo em (ETEs)

<p style="text-align: center;">FORÇAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dispensa o custo de transporte de lodo de ETEs que dispõem em aterros. • Abundância de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, úteis na agricultura. • A economia em fertilizantes pode ser vista como um benefício direto para a agricultura. • Padrões de alta qualidade podem ser alcançados se dispostos corretamente no uso como recurso. • Em países com pouca extensão geográfica, representa uma vantagem de uso local. 	<p style="text-align: center;">FRAQUEZAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Falta de padronização dos valores exigidos de medidas de qualidade na agricultura, os quais variam de acordo a cada país. • Em alguns casos, o tratamento aplicado pode não ser eficaz na eliminação de contaminantes emergentes. • O reaproveitamento de lodo exige custos econômicos e energéticos. • A capacidade instalada na ETE já construída não é suficiente para atender a novas implementações.
<p style="text-align: center;">OPORTUNIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Crescente demanda por biofertilizantes no setor agrícola. • Incentivo a práticas sustentáveis e regulamentações favoráveis para economia circular • Redução de emissões de gases de efeito estufa com o uso do lodo como recurso renovável. • Possíveis parcerias com diversos setores econômicos (siderúrgica, agrícola, design, tecnologia). • Facilita a recuperação de nutrientes quando bem implementado • Despoluição de cursos hídricos e águas freáticas. • Demanda por frutas e vegetais frescos, que se beneficiam da aplicação de biossólidos vindos das ETEs. • Melhoria na qualidade para aplicação agrícola. 	<p style="text-align: center;">AMEAÇAS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incertezas regulatórias sobre a aplicação de lodo em solos agrícolas devido à presença de contaminantes. • Falta de estratégia nacional de longo prazo e cenário político instável. • Custos de investimento e operação são altos. • Sensibilidade de algumas tecnologias frente a condições climáticas adversas. • Pouco ou nenhum orçamento em países em desenvolvimento. • Má gestão e gerenciamento dos mecanismos de implementação de tecnologias. • Falta de estratégias operacionais para o controle de novas tecnologias.

Fonte: Autora (2024)

A recuperação de biogás na forma de energia térmica ou calorífica também é uma prática essencial para a economia circular e a redução da pegada de carbono das ETEs. A digestão anaeróbia do lodo permite a produção de biogás, que pode ser utilizado para geração

de energia elétrica e térmica, promovendo autossuficiência energética dentro das ETEs. O uso de microturbinas e sistemas de cogeração, o biogás pode abastecer a própria estação e áreas adjacentes, tal reaproveitamento ajuda na redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, muitas ETEs ainda queimam o biogás de forma simples, liberando-o na atmosfera sem aproveitamento energético. Isso indica uma necessidade de maiores investimentos e incentivos para o uso otimizado do biogás. A introdução de sistemas e recursos locais inovadores podem maximizar o potencial energético desse recurso e diminuir a dependência de fontes externas. Por sua vez, controlar a composição da matéria-prima e eficiência dos organismos metanogênicos, pode contribuir na melhora da operação do sistema.

O reúso de águas residuais tratadas é outra estratégia essencial, especialmente diante da crescente escassez hídrica e de secas prolongadas em diversas regiões. O efluente tratado pode ser utilizado para fertirrigação e em outras aplicações não potáveis, como irrigação de áreas verdes e uso industrial. Estudos ressaltam que o reúso de água residual contribui para a segurança hídrica e alimentar em regiões áridas. Contudo, a presença de poluentes emergentes e microplásticos, limita a aplicação direta desse efluente em solos agrícolas. Assim, o desenvolvimento de tecnologias avançadas de tratamento e um monitoramento constante são necessários para garantir a segurança do recurso. A eliminação ou controle desses contaminantes pode contribuir para a economia circular, saúde do solo e segurança alimentar quando aplicada a agriculturas locais e permacultura. Outra consideração importante é que a logística da distribuição da água recuperada possui limitações estruturais, pelos altos custos de encanações ou sistemas de bombeamento, como caso particular no estudo de Caso de Valência na Espanha, os agricultores aceitam essa fonte de água se não tiverem que pagar pelas águas residuais tratadas (como os custos de bombeamento). Tal exemplo demonstra que a atuação de entes públicos e normativas deve ser estabelecida.

6. CONCLUSÕES

Por meio da Revisão Sistemática da Literatura (RSL), foi possível realizar o mapeamento de 32 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) que adotam práticas de circularidade. A análise desses artigos permitiu a criação de um banco de dados sobre os recursos recuperados, tecnologias empregadas e estudos inovadores relacionados ao tratamento de resíduos de ETEs em escala real e escala piloto.

Observou-se que a gestão de águas residuais, ao longo da história associada ao descarte de águas residuais. E que por muito tempo o despejo de águas residuais por dispersão e diluição, foram predominantes até ter grandes impactos em setores econômico e bem estar social, principalmente agravados pelo crescimento populacional e falta de investimento no saneamento.

Se bem no início do século XX, os problemas associados ao saneamento em países desenvolvidos parecem estar evoluindo ou solucionado problemáticas associadas à poluição de água. No entanto, nos dias de hoje ainda há grandes populações que vivem em países pobres e em desenvolvimento que não têm água potável nem saneamento.

Frente a tais necessidades, econômica, social e ambiental, a recuperação de águas como recurso finito, disposição adequada dos lodos gerados e geração de subprodutos em ETEs, reflete como um cenário de maior interesse científico e governamental em investigar formas de aproveitamento de recursos, alinhando-se aos princípios da economia circular, que buscam transformar resíduos em insumos para novos processos produtivos. Portanto essa abordagem é essencial para minimizar o impacto ambiental das ETEs e aumentar a eficiência na gestão de resíduos.

A economia circular se apresenta como um conceito que visa substituir os conceitos de economia adotados antigamente na sociedade, principalmente antes da revolução industrial, nas quais escolas econômicas assumiram os recursos naturais como ilimitados, segundo o modelo tradicional linear de "extrair, produzir e descartar".

O método utilizado nessa pesquisa permitiu um mapeamento abrangente e sistemático, contribuindo para a identificação de práticas inovadoras e eficientes na gestão de resíduos em ETEs. Visando explorar estudos de caso em ETEs, com implementação de tecnologias avançadas, integração de sistemas de reaproveitamento de resíduos na forma de recuperação de recursos.

Ao integrar processos de recuperação de energia, nutrientes e água e adaptar as tecnologias às necessidades locais, as ETEs podem desempenhar um papel central na construção de uma economia circular. Essa abordagem proporciona alternativas econômicas na gestão de resíduos e reduz a pressão sobre os recursos naturais, especialmente em um contexto de crescimento populacional e aumento da demanda por água, energia e alimentos.

Além disso, é necessária uma mudança cultural na sociedade para que os produtos recuperados sejam amplamente aceitos, assim como fortalecer as políticas públicas e legislações, a fim de garantir cada vez mais dados confiáveis sobre os fluxos de águas residuais, o desempenho dos sistemas de tratamento e a recuperação de recursos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: resíduos sólidos – classificação. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASeESGOTOSDespoluicaodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf. Acesso em: 5 nov. 2024.

ALMEIDA, Otávio Álvares. Qualidade da água de irrigação Cruz das Almas: Embrapa, 2010. Disponível em: http://www.cnpmf.embrapa.br/publicacoes/livro_qualidade_agua.pdf. Acesso em: 2 jan. 2024.

AMARAL, K. G. C. D.; RIETOW, J. C.; AISSE, M. M. Avaliação do ciclo de vida ambiental de uma ETE que emprega filtro biológico percolador, de baixa taxa, como pós-tratamento de um reator UASB e diferentes alternativas de gerenciamento de lodo. Revista Ambiente & Água, v. 16, p. e2648, 2021.

AMMENBERG, Jonas; ANDERBERG, Stefan; LÖNNQVIST, Tomas; GRÖNKVIST, Stefan; SANDBERG, Thomas. Biogas in the transport sector – actor and policy analysis focusing on the demand side in the Stockholm region. Resources, Conservation and Recycling, v. 129, p. 70-80, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.010>.

AMORIM JÚNIOR, Sérgio Siqueira de; PEREIRA, Mariana Antonio de Souza; LIMA, Priscila de Moraes; MARISHIGUE, Marjuli; GUILHERME, Denilson de Oliveira. Circular Economy in the Biosolids Management by Nexus Approach: A View to Enhancing Safe Nutrient Recycling—Pathogens, Metals, and Emerging Organic Pollutants Concern. Sustainability, v. 14, n. 22, p. 14693, nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142214693>.

ANÍCIO, Sabrina de Oliveira; SALAZAR, Brenda Franciss Cóndor; FERRAZ, João Alexandro; SILVEIRA, Louise; DICTORO, Vinicius Perez; MALHEIROS, Tadeu Fabricio. Circular economy in sewage treatment stations: mapping in the scientific literature, research in the context of PCJ basins and a decision-making tool. RISUS - Journal on Innovation and Sustainability, v. 13, n. 4, p. 83-102, 2022. DOI: [10.23925/2179-3565.2022v13i4p83-102](https://doi.org/10.23925/2179-3565.2022v13i4p83-102).

AZEVEDO JUNIOR, Célio Manso de; SANTOS, Marcos. Água de reuso: reutilização do efluente final de uma estação de tratamento de esgoto em suas próprias unidades operacionais. em XIX Simpósio de excelência em gestão e tecnologia, 2022.

BAPTISTA, Diogo José Fernandes. Afluências indevidas nas redes de drenagem públicas. Efeitos das bacias de retenção. 2021. Dissertação de Mestrado. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/135358>. Acesso em: 23 ago. 2024

BAILER, Cyntia; TOMITCH, Leda Maria Braga; D'ELY, Raquel Carolina Souza. Planejamento como processo dinâmico: a importância do estudo piloto para uma pesquisa experimental em linguística aplicada. Revista XXIV, p. 129-146, 2011. São Paulo: LAEL/PUCSP. ISSN 2237-759X.

BEZIRGIANNIDIS, A. et al. Renewable energy recovery from sewage sludge derived from chemically enhanced precipitation. Renewable Energy, v. 162, p. 1811–1818, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.005>

BIANCHI, Ana Maria; SANTOS, Antonio Tiago Loureiro Araújo dos. Adam Smith: filósofo e economista. São Leopoldo: Instituto Humanitas Unisinos. Disponível em: <https://www.ihu.unisinos.br/images/stories/cadernos/ideias/035cadernosihuideias.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofóssido em solos, e dá outras providências. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&view=atnormativo&id=726. Acesso em: 22 ago. 2024

BRASIL. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Distrito Federal: Probiogás, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (Org.), 2015.

BRASIL. Membros e Estrutura Organizacional da OCDE. Ministério da Economia, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/ocde/membros-e-estrutura-organizacional-da-ocde>. Acesso em: 15 mai. 2024.

BRINGHENTI, Jacqueline Rogéria; BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez; PIVELI, Roque Passos; GÜNTHER, Wanda Maria Risso. Codisposição de lodos de tratamento de esgotos em aterros sanitários brasileiros: aspectos técnicos e critérios mínimos de aplicação. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, n. 5, p. 891-899, set./out. 2018. DOI: 10.1590/S1413-41522018124980.

BRINGHENTI, Jacqueline Rogéria. Codisposição de lodos de tratamento de esgotos em aterros sanitários brasileiros: aspectos técnicos e critérios mínimos de aplicação. Scielo, [S. l.], p. 1, 30 ago. 2022. DOI: 10.1590/S1413-41522018124980. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/fH8DCPL39RVrQrKrJY8rqpP/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 21 jun. 2024

BRITTO, Ana Lúcia Nogueira de Paiva; PESSOA, Zoraide Souza. Crise climática, cidades e reforma urbana: estado da arte de estudos e pesquisas. Dossiê: Crise Climática, Cidades e Reforma Urbana. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2023-5801>. Acesso em:

BUGAIAN, Larisa; DIACONU, Cristina. Circular economy: concepts and principles. Technical University of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3871301>.

CETESB. Reuso de água. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/tpos-de-agua/reuso-de-agua/>. Acesso em: 4 nov. 2024

CAVIERES, L.; BAZAES, J.; MARTICORENA, P.; RIVEROS, K.; MEDINA, P.; SEPÚLVEDA, C.; RIQUELME, C. Pilot-scale phycoremediation using Muriellopsis sp. for wastewater reclamation in the Atacama Desert: microalgae biomass production and pigment recovery. Water Science and Technology, v. 83, n. 2, p. 331–343, 15 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.576>. Acesso em: 2 set. 2024

CAPUA, F. D. et al. Air side-stream ammonia stripping in a thin film evaporator coupled to high-solid anaerobic digestion of sewage sludge: Process performance and interactions. Journal of Environmental Management, v. 295, p. 113075, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113075>

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. Inovação para cidades sustentáveis: Soluções baseadas na Natureza. Brasília, DF: CGEE, 2020. 22 p

CERQUEIRA, Hugo E. A. da Gama. Especulando o imponderável: instabilidade, incerteza e adaptação no processo de policy making. *Revista de Economia Política*, v. 43, n. 2, p. 303-319, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rep/a/TCzJ99bQ6rKCXYzhdcXP8Tw/>.

CHANG, C.-C. et al. A Case Study on the Electricity Generation Using a Micro Gas Turbine Fuelled by Biogas from a Sewage Treatment Plant. *Energies*, v. 12, n. 12, 2019. <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/12/242>

CHRISTODOULOU, A.; STAMATELATOU, K. Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. *Water Science and Technology*, v. 73, n. 3, p. 453-462, 2016. DOI: [10.2166/wst.2015.521](https://doi.org/10.2166/wst.2015.521).

COCÂRȚĂ, D. M. et al. Biodegradable Waste Treatment: Sewage Sludge Composting - A Case Study. 2021 10th International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM). Anais...2021. https://www.researchgate.net/publication/356619529_Biodegradable_Waste_Treatment_Sewage_Sludge_Composting_-_A_Case_Study

COLLIVIGNARELLI, Maria Cristina; ABBÀ, Alessandro; FRATTAROLA, Andrea; CARNEVALE MIINO, Marco; PADOVANI, Sergio; KATSOYIANNIS, Ioannis; TORRETTA, Vincenzo. Legislation for the Reuse of Biosolids on Agricultural Land in Europe: Overview.

COLLIVIGNARELLI, M. C. et al. Strong minimization of biological sludge production and enhancement of phosphorus bioavailability with a thermophilic biological fluidized bed reactor. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582021004924>

COLTURATO, L. F. Dessulfuração de biogás da metanização da vinhaça: uma nova abordagem para remoção de altas concentrações de H₂S. 2015. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2015.

CORREA, R.S; Fonseca, Y.M.; CORREA, A.S. Produção de bio sólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v11.n.4, p.420- 426, ago.2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n04a12.pdf>. Acesso em: 15 set. 2024

CZUBA, K. et al. Towards the circular economy — A pilot-scale membrane technology for the recovery of water and nutrients from secondary effluent. *Science of The Total Environment*, v. 791, p. 148266, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148266>

DELLAGNEZZE, René. 50 anos da Conferência de Estocolmo (1972-2022) realizada pelas Nações Unidas sobre o meio ambiente humano [livro eletrônico]. São Paulo: Arche, 2022. 159 p. Formato: PDF. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/6769/2600>.

DE FEO, Giovanni; GEORGE, Antoniou; FARDIN, Franz; EL-GOHARY, Fatma; ZHENG, Xiao Yun, et al. The historical development of sewers worldwide. *Sustainability*, v. 6, n. 6, p. 3936-3974, 2014. DOI: 10.3390/su6063936.

DINOVA, N.; PENEVA, K.; BELOUHOVA, M.; RANGELOV, J.; SCHNEIDER, I.; TOPALOVA, Y. FISH analysis of microbial communities in a full-scale technology for biogas production. *Engineering in Life Sciences*, v. 18, n. 12, p. 914–923, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/elsc.201800041>. Acesso em: 5 abr. 2024

DOS SANTOS, M. T. L. F. A economia perversa: o impacto dos mercados sobre o meio-ambiente. *Prim Facie*, [S. l.], v. 5, n. 9, 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/primafacie/article/view/7211>. Acesso em: [data de

acesso].

DURÁN, Freddy; ROBLES, Ángel; GIMÉNEZ, Juan Bautista; FERRER, José; RIBES, Josep; SERRALTA, Joaquín. Modeling the anaerobic treatment of sulfate-rich urban wastewater: Application to AnMBR technology. *Water Research*, v. 184, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116133>

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Circular Economy: Introduction. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Archive. [ellenmacarthurfoundation.org](https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/pt/fundacao-ellen-macarthur/a-fundacao). Disponível em: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/pt/fundacao-ellen-macarthur/a-fundacao>

ESPÍNDOLA, Isabela Battistello; RIBEIRO, Wagner Costa. Cidades e mudanças climáticas: desafios para os planos diretores municipais brasileiros. *Cadernos Metrópole*, v. 22, n. 48. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2020-4802>.

EUROPEAN COMMISSION. Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. Brussels: European Commission, 2015

FAJARDO, P. A. Monitoramento de impactos ambientais pós-implantação de estações de esgotos sanitários. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana), São Carlos, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. AQUAMAPS: Global Spatial Database on Water and Agriculture. Disponível em: <https://data.apps.fao.org/aquamaps/?lang=en>. Acesso em: 2 nov. 2024

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW): managing systems at risk. Roma: FAO; Londres: Earthscan, 2011. 285 p. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/017/i1688e/i1688e.pdf>. Acesso em: [data de acesso].

FESTI, A.V. Águas de chuva na rede de esgoto sanitário – suas origens, interferências e consequências. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande, Mato Grosso do Sul. Setembro, 2005. Disponível em: <http://site.conpedi.org.br/publicacoes/e712c350/s3l44u92/5sQLD6r48xY7e6nY.pdf>

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). Manual de saneamento. Brasil: FUNASA, 2019. Disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/handle/123456789/506>.

FUZETTI, D. L. K. Noções Básicas de Economia. São Paulo: Editora Autores do Brasil, 2024. ISBN 9786560480773. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=XZsNEQAAQBAJ>.

GARDETTI, Miguel Angel. Introduction and the concept of circular economy. In: MUTHU, Subramanian Senthilkannan (Ed.). Circular economy in textiles and apparel. Woodhead Publishing, 2019. (The Textile Institute Book Series). p. 1-11. ISBN 9780081026304. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102630-4.00001-7>.

GEISSDOERFER, Martin; SAVAGET, Paulo; BOCKEN, Nancy; HULTINK, Erik Jan. The Circular Economy - A New Sustainability Paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757-768, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=2930842>. Acesso em: [data de acesso].

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of*

Cleaner Production, v. 114, p. 11-32, 2016. DOI: [10.1016/j.jclepro.2015.09.007](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007).

GERBA, Charles P.; PEPPER, Ian L. Chapter 24 - Wastewater Treatment and Biosolids Reuse. In: MAIER, Raina M.; PEPPER, Ian L.; GERBA, Charles P. (Ed.). Environmental Microbiology. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2009. p. 503-530. ISBN 9780123705198.

GIWA, Abdulmoseen Segun; MAURICE, Ndungutse Jean; LUOYAN, Ai; LIU, Xinxin; YUNLONG, Yang; HONG, Zhao. Advances in sewage sludge application and treatment: Process integration of plasma pyrolysis and anaerobic digestion with the resource recovery. Heliyon, v. 9, n. 9, e19765, 2023. ISSN 2405-8440. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19765>.

GUREVA, Maria; DEVIATKOVA, Yulia. Formation of the concept of a circular economy. Sistemas & Gestão, v. 15, p. 156-169, 2020. DOI: [10.20985/1980-5160.2020.v15n2.1656](https://doi.org/10.20985/1980-5160.2020.v15n2.1656).

HAGENVOORT, Joep et al. Reusing Treated Waste-Water from a Circular Economy Perspective—The Case of the Real Acequia de Moncada in Valencia (Spain). Water, v. 11, p. 1830, 2019. DOI: 10.3390/w11091830

HAWKEN, Paul; LOVINS, Amory; LOVINS, L. Hunter. Capitalismo natural: criando a próxima revolução industrial. Tradução de Luiz A. de Araújo e Maria Luzia Felizardo. 1. ed. São Paulo: Editora Cultrix, 2000. p. 2.

IBGE. Censo Demográfico 2010. 2010. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-demografico/demografico-2010/inicial>. Acesso em: 01 jun. 2023.

IBGE. Quatro em cada dez municípios não têm serviço de esgoto no país. Agência Notícias, 2020. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/28326-quatro-em-cada-dez-municipios-nao-tem-servico-de-esgoto-no-pais>. Acesso em: 6 mai, 2024

IBGE. Urbanização. Atlas Geográfico Escolar. Disponível em: <https://atlasescolar.ibge.gov.br/glossario/urbanizacao.html>. Acesso em: [data de acesso].

IZEPÃO, Rosalina Lima; BRITO, Elohá Cabreira; BERGOCE, Janaína. O indivíduo na economia neoclássica, comportamental e institucional: da passividade à ação. Leituras de Economia Política, Campinas, n. 31, p. 55-74, jul./dez. 2020. Disponível em: https://www.eco.unicamp.br/images/arquivos/artigos/LEP/L31/08_Artigo04.pdf. Acesso em: 15 jun, 2024

JÚNIOR, S. S. DE A. et al. Evidences on the application of biosolids and the effects on chemical characteristics in infertile tropical sandy soils. Cleaner Engineering and Technology, v. 4, p. 100245, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790821002056>.

KALEMBA, Katarzyna. Circular Economy in Wastewater Treatment Plant. Architecture, Civil Engineering, Environment, v. 13, p. 93-97, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21307/ACEE-2020-033>

KIRCHHERR, Julian; YANG, Nan-Hua Nadja; SCHULZE-SPÜNTRUP, Frederik; HEERINK, Maarten J.; HARTLEY, Kris. Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. Resources, Conservation and Recycling, v. 194, 2023. DOI: [10.1016/j.resconrec.2023.107001](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001).

LAGE, S.; TOFFOLO, A.; GENTILI, F. G. Microalgal growth, nitrogen uptake and storage, and dissolved oxygen production in a polyculture based-open pond fed with municipal wastewater in

northern Sweden. Chemosphere, v. 276, p. 130122, 2021.

LAMAS, Wendell de Queiróz. Análise termoeconômica de uma mini-estação de tratamento de esgoto com auto-suficiência energética. 2007. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/f8fba99f-9f45-451f-b946-37bc4a2abd11/content>.

LARRIBA, Oriol; ROVIRA-CAL, Eric; JUZNIC-ZONTA, Zivko; GUIASOLA, Albert; BAEZA, Juan Antonio. Evaluation of the integration of P recovery, polyhydroxyalkanoate production and short cut nitrogen removal in a mainstream wastewater treatment process. Water Research, v. 172, 2020. DOI: [10.1016/j.watres.2020.115474](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115474).

Laura Rossi, Sini Reuna, Tommi Fred, Mari Heinonen; RAVITA Technology – new innovation for combined phosphorus and nitrogen recovery. Water Sci Technol 29 December 2018; 78 (12): 2511–2517. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.011>

LEÃO, I. Z. C. C.; CARVALHO, A. L. B. D. de. Uma introdução à história econômica. Economia e Sociedade, v. 17, n. 3, p. 539–548, dez. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ecos/a/7gDCGL9TJ8GqL8yz5zk4wBD/>. Acesso em: [data de acesso].

LEITE, Leandro Aparecido; PINTO, Alberjan de Jesus Jean; BARREIROS, Nilson Rodrigues. Sistemas híbridos: a integração entre as tecnologias de gestão e o pensamento enxuto. São Carlos: ABEPRO, 2010. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_sto_126_811_17324.pdf. Acesso em: [data de acesso].

LOFRANO, Giusy; BROWN, Jeanette. Wastewater management through the ages: A history of mankind. Science of The Total Environment, v. 408, n. 22, p. 5254-5264, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.062>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969710007564>. Acesso em:

LÓPEZ, A. et al. Microbiological quality of sewage sludge after digestion treatment: A pilot scale case of study. Journal of Cleaner Production, v. 254, p. 120101, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120101>

MAGALHÃES FILHO, Fernando Jorge Corrêa. Evidences on the application of biosolids and the effects on chemical characteristics in infertile tropical sandy soils. Cleaner Engineering and Technology, v. 4, p. 100245, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100245>.

MANCINI, G. et al. A water-waste-energy nexus approach to bridge the sustainability gap in landfill-based waste management regions. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120307280?via%3Dihub>

MANNINA, Giorgio; GÜLHAN, Hazal; NI, Bing-Jie. Water Reuse from wastewater treatment: The transition towards Circular Economy in the water sector. Bioresource Technology, v. 363, p. 127951, 2022. DOI: [10.1016/j.biortech.2022.127951](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127951).

MANNINA, G. et al. Water Resource Recovery Facilities (WRRFs): The Case Study of Palermo University (Italy). Water, v. 13, n. 23, 2021. <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/23/3413>

MAASS, O.; GRUNDMANN, P. Governing Transactions and Interdependences between Linked Value Chains in a Circular Economy: The Case of Wastewater Reuse in Braunschweig

(Germany). Sustainability, v. 10, n. 4, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10041125>

MCID, Ministério das Cidades; SNS, Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS - Diagnóstico Temático - Serviços de Água e Esgoto - Visão Geral - Ano de referência 2022. , 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-dosnis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf.

MEADOWS, Donella H.; MEADOWS, Dennis L.; RANDERS, Jørgen; BEHRENS III, William W. The Limits to Growth. New York: Universe Books, 1972. Disponível em: <https://www.clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/>. Acesso em: [data de acesso].

MELO, W.J., Marques, M.O. (2000). “Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas”. In: Betitoli, W. e Camargo, O.A.(eds), Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna, SP. EMPRAPA Meio Ambiente, p.11-24

METCALF & EDDY, Inc.; TCHOBANOGLOUS, G.; STENSEL, H. D.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. L. *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MOTTA, Alexandre de Medeiros; REBOLLAR, Paola Beatriz May. História econômica: livro didático. Palhoça: UnisulVirtual, 2015. 232 p. ISBN 978-85-7817-736-2. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/8fe5792f-17ba-4286-b1aa-faea67600f57>. Acesso em: [data de acesso].

MORAES, T. N. et al. Chapter 8 - Recovery of nutritional resources of urban sewage sludge in lettuce production. Em: STEFANAKIS, A.; NIKOLAOU, I. (Eds.). Circular Economy and Sustainability. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 113–127. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128216644000121?via%3Dihub>

MUELLER, Charles C. Os economistas e as inter-relações entre o sistema econômico e o meio ambiente. Versão preliminar. NEPAMA, Departamento de Economia, UnB, 2004. Disponível em: https://www.academia.edu/34044754/TEXTO_DISCIPLINA_ECOECO_UnB_Charles_Mueller_OS_ECONOMISTAS_E_AS_INTER_RELAC%C3%87%C3%95ES_ENTRE_O_SISTEMA_ECON%C3%94MICO_E_O_MEIO_AMBIENTE

MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. Journal of Business Ethics, v. 140, p. 369-380, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>. Acesso em: 15 mai, 2024.

NBR, A. (1986). 9648. Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro.

NECZAJ, E., & GROSSER, A. Circular Economy in Wastewater Treatment Plant—Challenges and Barriers. EWaS3 2018, 614. <https://doi.org/10.3390/proceedings2110614>.

OECD; UN-HABITAT. Intermediary Cities and Climate Change: An Opportunity for Sustainable Development. Paris: OEC OECD Publishing, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/23508323-en>. Acesso em: 08 ago. 2024

OLIVER, A. P. M.; SOUZA NETO, A. A.; QUADROS, D. G.; VALLADARES, R. E. Manual de treinamento em biodigestão. Salvador: Instituto Winrock – Brasil, 2008. REBELLO, F. F. P. Produção de cerveja. Revista Agrogeoambiental, Inconfidentes, p.145- 155, dez. 2009

OLIVEIRA, A. S. et al. Variability in the composition of extracellular polymeric substances from a full-scale aerobic granular sludge reactor treating urban wastewater. Journal of Environmental

Chemical Engineering, v. 8, n. 5, p. 104156, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104156>.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OECD); PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (UNDP). Capítulo 6: As implicações da urbanização em África para a transformação estrutural. In: Perspectivas Econômicas em África 2016. 2016. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264248649-10-pt.pdf>. Acesso em: 30 abr, 2024

OMETTO, Aldo; AMARAL, Weber; IRITANI, Diego; MASCARENHAS, Janaina; CHAVIN, Stella; PEDROSO, Marcelo; GEROLAMO, Mateus; BERTASSINI, Ana; FERREIRA, Camila; IWASAKA, Fernanda; GUZZO, Daniel; FERNANDES, Sânia; LIMA, Cláudio; KABBACH DE CASTRO, Luiz Ricardo. Economia Circular: Oportunidades e desafios para a indústria brasileira. 2018.

PBMC, 2016. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6

PEARCE, D. W.; TURNER, R. K. Economics of natural resources and the environment. New York: Harvester Wheatsheaf, 1990. eBook. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=ex8vaG6m4RMC&printsec=frontcover&hl=pt-PT&source=gbs_atb#v=onepage&q&f=false. Acesso em: [data de acesso].

PELTOLA, Petteri; MYÖHÄNEN, Kari; LAASONEN, Arttu; HYPPÄNEN, Timo. An advanced process for thermal treatment of municipal sewage sludge. July 2021. https://www.researchgate.net/publication/369978150_An_advanced_process_for_thermal_treatment_of_municipal_sewage_sludge

PIEKUTIN, J. et al. The Efficiency of the Biogas Plant Operation Depending on the Substrate Used. Energies, v. 14, n. 11, 2021. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/11/3157>

PROBIOGÁS. Guia prático do biogás. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2010. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/guia-pratico-do-biogas.pdf>. Acesso em: 17 set, 2024

REDALYC. O desenvolvimento histórico do saneamento e a relação com a saúde pública. Redalyc.org, 2023. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/6080/608065705003/>. Acesso em: 15 mai, 2024.

REDDY, M. V. et al. Bacterial conversion of waste into polyhydroxybutyrate (PHB): A new approach of bio-circular economy for treating waste and energy generation. Bioresource Technology Reports, v. 7, p. 100246, 2019. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2589014X19301367>

ROMAN, Carla Rose. A ciência econômica e o meio ambiente: uma discussão sobre crescimento e preservação ambiental. Passo Fundo, 1996. Disponível em: http://cepeac.upf.br/download/rev_n07e08_1996_art6.pdf. Acesso em: 29 jul, 2024.

Royal Commission on Sewage Disposal Eighth Report. Standards and tests for sewage and sewage effluent discharging to rivers and streams. Cd 6464, London, 1912. Disponível em: <https://ia601306.us.archive.org/7/items/cu31924003641929/cu31924003641929.pdf>.

RUFÍ-SALÍS, M. et al. Can wastewater feed cities? Determining the feasibility and

environmental burdens of struvite recovery and reuse for urban regions. *Science of The Total Environment*, v. 737, p. 139783, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139783>

SAKIEWICZ, P. et al. Innovative artificial neural network approach for integrated biogas – wastewater treatment system modelling: Effect of plant operating parameters on process intensification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 124, p. 109784, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109784>

SANTOS, A. F. et al. Beneficial use of lime mud from kraft pulp industry for drying and microbiological decontamination of sewage sludge. *Journal of Environmental Management*, v. 296, p. 113255, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113255>

SANTOS, Lourival Santana; ARAÚJO, Ruy Belém de. A revolução industrial. *História Econômica e Geral*, 2018. Disponível em: https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/08395302122015Historia_Contemporanea_I_Aula_4.pdf. Acesso em: 12 ago, 2024.

SATHLER, Douglas; LEIVA, Guilherme. A cidade importa: urbanização, análise regional e segregação urbana em tempos de pandemia de Covid-19. *Revista Brasileira de Estudos de População*, v. 39, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.20947/S0102-3098a0205>. Acesso em: 26 out, 2024.

SCHAUENBERG, Tim; CHRISTOFARO, Beatrice. Crise hídrica atinge a Europa. In: DW Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/sobre-a-dw-brasil/a-44834912>.

SHARMA, G. K. et al. Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production. *Journal of Environmental Management*, 2021. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33706096/>

SHILTON, A. N. et al. Phosphorus removal by an ‘active’ slag filter—a decade of full scale experience. *Water Research*, v. 40, n. 1, p. 113–118, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.002>

ŠKUFGA, D. et al. Phycoremediation of municipal wastewater: Removal of nutrients and contaminants of emerging concern. *Science of The Total Environment*, v. 782, p. 146949, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146949>

SMOL, Marzena. Circular Economy in Wastewater Treatment Plant—Water, Energy and Raw Materials Recovery. *Energies*, v. 16, n. 9, p. 3911, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16093911>. Acesso em: 15 ago, 2024

SMOL, M.; ADAM, C.; PREISNER, M. Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 22, p. 682–697, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00960-z>

SOUZA, Tatiane Pereira. Tratamento do lodo de esgoto por compostagem: uso agrícola do composto e a redução da emissão de gases de efeito estufa. 2022. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

TOMBINI, Débora Aparecida; SAQUET, Marcos Aurélio. Migração e relação campo-cidade. In: SEMINÁRIO ESTADUAL DE ESTUDOS TERRITORIAIS, VII, 2014, Paraná. Anais [...]. Disponível em: <https://memoria.apps.uepg.br/seet/wp-content/uploads/sites/5/2014/08/MIGRA%C3%87%C3%83O-E-RELA%C3%87%C3%83O-CAMPO-CIDADE.pdf>. Acesso em: 22 nov, 2024

THE BLUE ECONOMY. The Blue Economy. Disponível em:

<https://www.theblueeconomy.org/en/the-blue-economy/>. Acesso em: 22 nov, 2024

UNITED NATIONS. Sustainable cities, human mobility and international migration: Report of the Secretary-General. Economic and Social Council, Commission on Population and Development, Fifty-first session, 9–13 April 2018. Disponível em: <https://documents.un.org/doc/undoc/gen/n18/024/12/pdf/n1802412.pdf>. Acesso em: 8 nov, 2024

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>. Acesso em: 12 ago, 2024.

UN-Habitat Brasil. A população mundial será 68% urbana até 2050. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/188520-onu-habitat-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-ser%C3%A1-68-urbana-at%C3%A9-2050>. Acesso em: [data de acesso].

UNESCO; UN-WATER. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2021: O valor da água. Fatos e dados. Paris: UNESCO, 2021. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por/PDF/375751por.pdf.multi. Acesso em:

UNICEF. Without toilets, childhood is even riskier due to malnutrition, 2015, Disponível em: <https://www.unicef.org/tanzania/press-releases/unicef-without-toilets-childhood-even-riskierdue-malnutrition> . Acesso em: 16, maio 2024.

UN-HABITAT. World Cities Report 2022: Poverty and Inequality: Enduring Features of an Urban Future? Cap. 3. Disponível em: https://unhabitat.org/sites/default/files/2022/07/chapter_3_wcr_2022.pdf. Acesso em: [data de acesso].

VASCONCELLOS, Marco Antonio S. de; GARCIA, Manuel E. Fundamentos da economia. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2004. Disponível em: <https://vademecumdireito.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/04/vasconcellos-e-garcia-fundamentos-de-economia-1.pdf>. Acesso em: 28 jul, 2024.

Vassalle, L., Rosa-Machado, A. T., Mota Filho, C. R., Ferrer, I., & Passos, F. (2021). Avaliação das Lagoas de Alta Taxa pós-tratando esgoto doméstico de reatores UASB em vistas à qualidade do efluente e codigestão anaeróbia. Revista RedBioLAC, 5(1), 48-54. <http://revistaredbiolac.org/index.php/revistaredbiolac/article/view/41>

Von Sperling, M. (2005). Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. 3ª ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG.

VOLSCHAN, Isaac. Sistema Unitário X Sistema Separador Absoluto. Revista DAE, 2009. Disponível em: https://www.academia.edu/89280175/Sistema_Unit%C3%A1rio_X_Sistema_Separador_Absoluto.

Water Reuse Study from Urban WWTPs via c-Ultrafiltration and Ozonation Technologies: Basis for Resilient Cities and Agriculture. Agronomy, v. 11, n. 2, 2021. DISPONIVEL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/2/322>

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT-WCED. Our common future. 1987. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. Acesso em: 19, ago 2024

YADAV, Geetanjali; MISHRA, Arpit; GHOSH, Parthasarathi; SINDHU, Raveendran; VINAYAK, Vandana; PUGAZHENDHI, Arivalagan. Technical, economic and environmental feasibility of resource recovery technologies from wastewater. Science of The Total Environment, v. 796, 2021, p. 149022. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.149022](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149022).

UNITED NATIONS. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6: Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos. Nações Unidas, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals/goal6>. Acesso em: 12 set, 2024

XIONG, J. et al. Mature landfill leachate treatment by the MBBR inoculated with biocarriers from a municipal wastewater treatment plant. Mature landfill leachate treatment by the MBBR inoculated with biocarriers from a municipal wastewater treatment plant, v.119, v. 304-310. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.08.019>

ZHOU, Y. et al. A circular economy use of recovered sludge cellulose in wood plastic composite production: Recycling and eco-efficiency assessment. Waste Management, v. 99, p. 42–48, 2019. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19305562?via%3Dihub>