

Inovações sustentáveis para o tratamento de águas residuais: A atuação do Engenheiro Químico na Saúde Coletiva

Sustainable innovations for wastewater treatment: The Chemical Engineer's role in Public Health

Innovaciones sostenibles para el tratamiento de aguas residuales: El papel del Ingeniero Químico en la Salud Pública

Recebido: 15/01/2025 | Revisado: 11/02/2025 | Aceitado: 13/02/2025 | Publicado: 17/02/2025

Elizete Maria da Silva Moreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4232-6802>

Centro Universitário de Patos de Minas, Brasil

E-mail: elizete@unipam.edu.br

Lília Eduarda Corrêa Braga

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5330-2609>

Centro Universitário de Patos de Minas, Brasil

E-mail: liliaeduarda@unipam.edu.br

Resumo

Objetivou-se investigar quais as alternativas tecnológicas sustentáveis para o tratamento de águas residuais, bem como a atuação do engenheiro químico nesse setor, visando contribuir com o desenvolvimento de reflexões sobre o tema. Trata-se de uma revisão integrativa da literatura por meio da pesquisa avançada à base de dados PubMed. Foi usado o termo de busca *sustainable alternatives for the treatment of water resources* com os filtros texto completo, gratuito, publicações de 2022, em qualquer idioma, disponíveis gratuitamente e na íntegra e que respondessem ao objetivo desse estudo. Foram selecionados 12 artigos para leitura completa seguida da análise semântica. No que se refere às metodologias usadas na elaboração dos artigos analisados verificou-se que a mais utilizada foi a pesquisa de revisão, seguida de pesquisa experimental e estudo de caso. Verificou-se ainda que a maioria do material analisado foi publicada em periódicos destinados a profissionais com interesses ambientais, apresentando conteúdos informativos e relevantes para a área. As alternativas tecnológicas sustentáveis para o tratamento de águas residuais incluem abordagens nanotecnológicas, sistema de microalgas, osmose direta, absorção, células eletrolíticas, uso de biorreatores e tecnologias de reuso da água. Quanto ao papel do engenheiro químico frente aos desafios do saneamento no Brasil verificou-se que é fundamental na gestão de soluções para esse problema. Futuros estudos podem realizar análise mais abrangente para fornecer maior consistência aos atuais achados.

Palavras-chave: Contaminação da água; Purificação de água residual; Doenças de veiculação hídrica; Atribuições do engenheiro químico.

Abstract

The objective was to investigate sustainable technological alternatives for wastewater treatment, as well as the role of chemical engineers in this sector, aiming to contribute to the development of reflections on the topic. This is an integrative review of the literature through advanced search in the PubMed database. The search term *sustainable alternatives for the treatment of water resources* was used with the filters full text, free, publications from 2022, in any language, available free of charge and in full and that responded to the objective of this study. 12 articles were selected for full reading followed by semantic analysis. Regarding the methodologies used in the preparation of the articles analyzed, it was found that the most used was review research, followed by experimental research and case study. It was also found that the majority of the material analyzed was published in journals aimed at professionals with environmental interests, presenting informative and relevant content for the area. Sustainable technological alternatives for wastewater treatment include nanotechnological approaches, microalgae systems, direct osmosis, absorption, electrolytic cells, use of bioreactors and water reuse technologies. Regarding the role of the chemical engineer in facing the challenges of sanitation in Brazil, it was found that it is fundamental in managing solutions to this problem. Future studies can perform a more comprehensive analysis to provide greater consistency to the current findings.

Keywords: Water contamination; Wastewater purification; Waterborne diseases; The role of the chemical engineer.

Resumen

El objetivo fue investigar alternativas tecnológicas sustentables para el tratamiento de aguas residuales, así como el papel de los ingenieros químicos en este sector, con el objetivo de contribuir al desarrollo de reflexiones sobre el tema. Se trata de una revisión integradora de la literatura mediante búsqueda avanzada en la base de datos PubMed. Con los

filtros se utilizó el término de búsqueda alternativas sostenibles para el tratamiento de los recursos hídricos texto completo, gratuito, publicaciones del año 2022, en cualquier idioma, disponibles de forma gratuita y completa y que respondieran al objetivo de este estudio. Se seleccionaron 12 artículos para lectura completa seguida de análisis semántico. En cuanto a las metodologías utilizadas en la elaboración de los artículos analizados, se encontró que la más utilizada fue la investigación de revisión, seguida de la investigación experimental y el estudio de caso. También se encontró que la mayoría del material analizado fue publicado en revistas dirigidas a profesionales con intereses ambientales, presentando contenidos informativos y relevantes para el área. Las alternativas tecnológicas sostenibles para el tratamiento de aguas residuales incluyen enfoques nanotecnológicos, sistemas de microalgas, ósmosis directa, absorción, celdas electrolíticas, uso de biorreactores y tecnologías de reutilización de agua. En cuanto al papel del ingeniero químico para afrontar los desafíos del saneamiento en Brasil, se constató que es fundamental en la gestión de soluciones a este problema. Los estudios futuros pueden realizar un análisis más completo para proporcionar una mayor coherencia a los hallazgos actuales.

Palabras clave: Contaminación del agua; Purificación de aguas residuales; Enfermedades transmitidas por el agua; El papel del ingeniero químico.

1. Introdução

Saneamento Básico (SB) se refere a um encadeamento de serviços, estruturas e políticas relacionadas à água e aos resíduos sólidos objetivando evitar danos ambientais e favorecer a qualidade de vida, uma vez que um meio ambiente equilibrado está ligado ao direito fundamental à saúde (2018). É, pois, essencial para o desenvolvimento de um país, uma vez que dele depende a qualidade de vida em sociedade. No entanto, mesmo com tamanha relevância há quem o relaciona apenas à água potável e ao tratamento de esgoto, aqui identificado como águas residuais, aquelas que, de algum modo, foram manipuladas pelo ser humano. Porém, SB apresenta definição muito mais abrangente, pois leva-se em consideração o controle de epidemias, o manejo de águas pluviais e de resíduos sólidos e a limpeza urbana, além de outras atividades vitais (Díaz & Nunes, 2020).

O saneamento é indispensável para que as atividades humanas possam ser realizadas. Isso pode ser enfatizado pela necessidade de água potável para satisfazer diversas finalidades, sejam elas para consumo próprio ou para obtenção de outros produtos essenciais (Leoneti, Prado & Oliveira, 2011). Dessa forma, o SB envolve um investimento de grande valor para a preservação das águas.

Devido à busca intensiva de meios para aperfeiçoamento do tratamento dos resíduos, as águas residuais têm sido caracterizadas como um tipo de insumo no processo industrial, pois além de evitar a contaminação das águas, tem a capacidade de produzir energia e até mesmo fertilizantes (INCT, 2019a). Ressalta-se que o Brasil possui certa vantagem em relação às técnicas para efetivar o saneamento. Isso ocorre porque o clima tropical característico do país favorece a remoção de matéria orgânica usando processo anaeróbico e reaproveitando o biogás para geração de eletricidade.

Mesmo com todas as vantagens de se ter um bom programa de saneamento e com a importância de se priorizar essa atividade, os serviços públicos brasileiros de SB são precários e insuficientes e a intensificação da desigualdade social só aumenta esse atraso (INCT, 2019b). No Brasil, a escassez de água potável afeta aproximadamente 35 milhões de pessoas, enquanto cerca de 100 milhões de brasileiros não têm acesso à coleta de esgoto, o que resulta em sérios problemas de saúde, levando muitos a serem hospitalizados devido a doenças transmitidas pela água contaminada (ITB, 2023a).

Outro ponto a ser analisado é a contaminação dos recursos hídricos através da emissão dos efluentes em seu curso, visto que a população mundial tem enfrentado uma intensa escassez de água, sendo essencial o desenvolvimento de alternativas tecnológicas e sustentáveis para a adoção de hábitos de conservação do meio ambiente (D'Agostin, Becegato & Baum, 2017). Portanto, é fundamental pesquisar e desenvolver técnicas alternativas que facilitem o tratamento dos resíduos domésticos e industriais, além de preservar a bacia hidrográfica (Rosa et al., 2020).

Os dados apontam ainda que o Brasil tem “grandes dificuldades com o tratamento do esgoto, do qual somente 51,20% do volume gerado é tratado – isto é, mais de 5,5 mil piscinas olímpicas de esgoto sem tratamento são despejadas na natureza

diariamente.” (ITB, 2023b, p. 2). Já a nível mundial, o número de pessoas sem acesso a água potável é de cerca de um bilhão (Díaz & Nunes, 2020) e aproximadamente 4,2 bilhões de pessoas não tenham acesso aos serviços de SB (ITB, 2022).

De acordo com INCT (2019a), o futuro do saneamento no Brasil se dá a partir da implantação de lagoas de estabilização que removam a matéria orgânica em locais com disponibilidade de área. Trata-se de uma tecnologia que possui simplicidade operacional, além de ser adequada às condições climáticas do país. Além disso, possibilita a recuperação de recursos como o biogás e o tratamento de águas residuais para produção e venda de fertilizantes, de modo a gerar receita que pode ser reinvestida na melhoria da infraestrutura de coleta e no tratamento de esgoto.

Melhorias contínuas na infraestrutura de SB são vitais e devem ser cobradas pela população junto aos órgãos responsáveis. No entanto, segundo INCT (2019a), esse fato é dificultado porque a infraestrutura de coleta de águas residuais sendo subterrânea e não visível diretamente, pode não ser percebida pela população e deixada em segundo plano. Portanto, a educação sanitária por parte da população, enfatizando o entendimento de que questões associadas às águas residuais estão relacionadas à qualidade ambiental e à saúde pública, precisa ser reestruturada. A população precisa exigir investimentos dos gestores nesse setor, demandar por esse serviço, mas para que isso ocorra é necessário que os envolvidos percebam que o gasto financeiro, na verdade, se trata de investimento. Nesse sentido, INCT (2019a, s. p.) diz que “os países desenvolvidos de forma geral já migraram totalmente o conceito de *Estação de Tratamento de Esgoto* para *Estação de Recuperação de Recursos*.”

Diante da necessidade de buscar melhorias para o programa de SB no Brasil, de modo específico para o desenvolvimento do acesso à rede de esgoto, foi criado em 2013 o Plano Nacional de Saneamento Básico (PNSB). É uma política pública que alia instalação de obras físicas, suporte político e gerencial de sustentabilidade considerando sua importância para saúde coletiva (Lahoz, 2018). Foi planejado com duração de 20 anos visando integrar o SB aos seus quatro componentes, que são o abastecimento de água potável (tratamento e distribuição), o tratamento de esgoto, a coleta de lixo com manejo dos resíduos sólidos e a drenagem e manejo das águas pluviais (Brasil, 2020; Brasil, 2022). O PNSB foi caracterizado como um conceito adequado para a coleta de esgoto e, para maior efetividade, foi aprovado em 2019 o Programa Saneamento Brasil Rural (PSBR) visando ampliar a evolução do atendimento apropriado a este tipo de saneamento. O PSBR é relevante para maior abrangência da coleta de esgoto, pois em regiões rurais é mais significativa a precariedade deste serviço devido à distância dos centros urbanos, que inviabiliza a utilização dos sistemas de tratamento de esgoto (Mesquita et al., 2021).

A dificuldade de coleta e tratamento de águas residuais no Brasil é agravada pela ineficiência dos gastos do Estado, colaborando para o histórico de baixos índices de saneamento (Fonseca, 2008). Há deficiência na infraestrutura de saneamento, principalmente no atendimento da população carente, dos moradores de favelas e do meio rural, devido aos desafios de caráter econômicos e de expansão urbana (Nascimento & Heller, 2005). Dessa forma, o domínio de novas ferramentas para esse tratamento é uma necessidade para a implantação de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) de forma abrangente, pois além de ser uma concepção ambiental, promove saúde e reduz gastos com saúde (Fonseca, 2008). Com isso, é perceptível que o desenvolvimento de um país está diretamente ligado ao saneamento, visto que quanto mais desenvolvido, menor o índice de carência da população por serviços de SB (Heller, 1998).

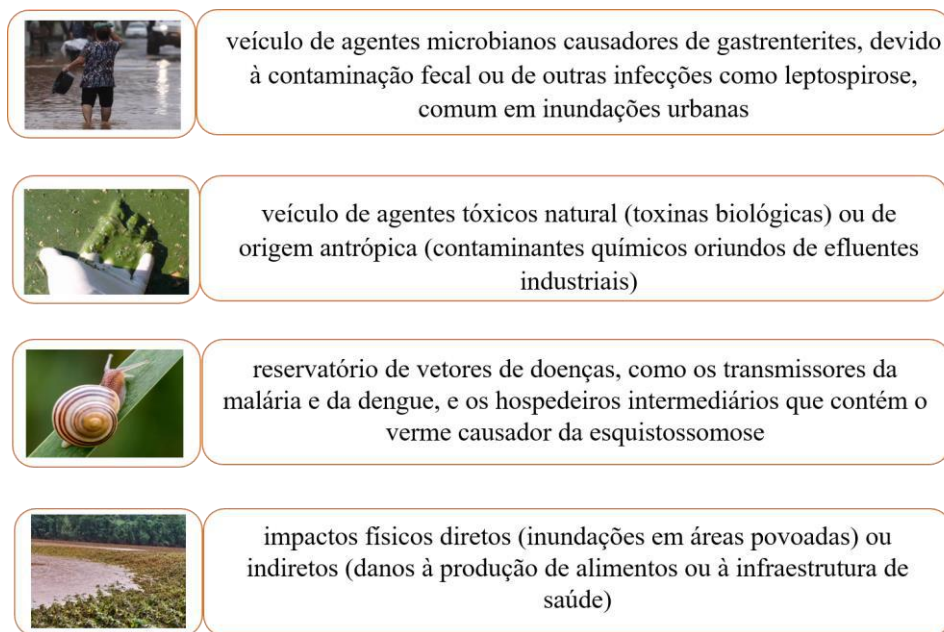
Os municípios com baixo investimento em saneamento possuem altos índices de doenças que estão relacionadas à deficiência do serviço, sendo muito preocupante, nos estados da região norte, onde menos de 25% da população têm acesso à rede de esgoto (ITB, 2021). Além disso, em 2020 foram registrados 1898 óbitos por doenças de veiculação hídrica das mais de 167 mil internações (ITB, 2024). O custo dessas internações ficou em cerca de R\$70 milhões, denotando que se 100% da população tivesse acesso ao SB, haveria uma redução de mais de 74 mil internações (CLP, 2024). Para cada real investido em saneamento básico, o governo economiza nove reais em saúde (WHO, 2017).

Os serviços de SB possibilitam preservar e melhorar as condições de vida da população, impactando em atividades econômicas e promovendo saúde (prevenção de doenças contraídas através de águas poluídas). Porém, no Brasil esses serviços são distribuídos de forma desigual e sua ausência gera impactos em indicadores socioeconômicos, como renda, planejamento urbano e saúde pública devido à proliferação de microrganismos que transmitem doenças. Dessa forma, ampliar os serviços de saneamento resultam em diminuição das internações e redução dos custos com saúde para os cofres públicos (BRK Ambiental, 2020).

O SB deve ser caracterizado como medida de medicina preventiva, pois sua ausência ou falha dos serviços contribui para a ocorrência de doenças causadas por veiculação hídrica, as quais segundo Bittencourt & Paula (2014), dividem-se em: (i) transmissão direta: ocorre geralmente em regiões desprovidas de serviços de saneamento, provocando cólera, febre tifoide, febre paratifoide, disenteria bacilar, disenteria amebiana, hepatite infecciosa e poliomielite e (ii) transmissão indireta: esquistossomose, fluorose, malária, febre amarela, bócio, dengue, tracoma, leptospirose, perturbações gastrointestinais de etiologia escura, infecção dos olhos, ouvidos, garganta e nariz. Lahoz (2018) acrescenta febre Chikungunya, zika vírus, botulismo, dermatofitose e difteria.

Além das doenças listadas, a exposição a um ambiente poluído impacta negativamente na produtividade dos indivíduos, afeta o desenvolvimento das crianças, e situações como diarreias constantes, desidratações e infecções intestinais decorrentes do consumo de água sem tratamento podem comprometer a nutrição e o crescimento da criança (São Paulo, 2009). A Figura 1 ilustra a associação da água contaminada com a saúde das pessoas.

Figura 1 — Relação da água com a saúde humana.



Fonte: Adaptado de Bittencourt & Paula (2014).

O desenvolvimento do saneamento tem evoluído gradativamente nos últimos anos, porém ainda existem algumas barreiras a serem enfrentadas. Estima-se investimento de R\$22 bilhões por ano para que ocorra o abastecimento de água e dos serviços de esgotamento sanitário para todo o território nacional. Desse modo, é muito importante que o poder público e a iniciativa privada unam esforços para atuar efetivamente na solução do problema (BRK Ambiental, 2020).

Nos dias atuais o engenheiro químico possui papel indispensável no planejamento e desenvolvimento de novas tecnologias para o tratamento de águas residuais, visando à sustentabilidade e à redução de gastos. Assim, ele procura aplicar

os conhecimentos de diversas bases, sejam empíricos ou técnicos, para a criação de novos produtos e mecanismos, sendo um profissional que visa o bem-estar mútuo, maior rendimento das operações, redução de custos e preservação do meio ambiente (Cremasco, 2015). O autor supracitado afirma ainda que, partindo do pressuposto das responsabilidades ambientais que todo engenheiro tem como prioridade, pode-se dizer que o papel desempenhado por estes profissionais se baseia no desenvolvimento de técnicas para diminuir a emissão de resíduos na rede hidrográfica, na criação de estratégias de controle de poluição e no monitoramento das atividades para o cumprimento das leis ambientais.

Portanto, o engenheiro químico desempenha papel essencial para as melhorias dos processos referentes ao tratamento de águas residuais; é por meio de processos físicos e químicos que as impurezas são retiradas para que a água possa retornar ao seu curso natural. Esse profissional contribui também com a invenção de novos produtos para o tratamento de esgoto diminuindo a perda de materiais, melhorando os processos de reuso de água e reduzindo o consumo de energia (CFQ, 2021).

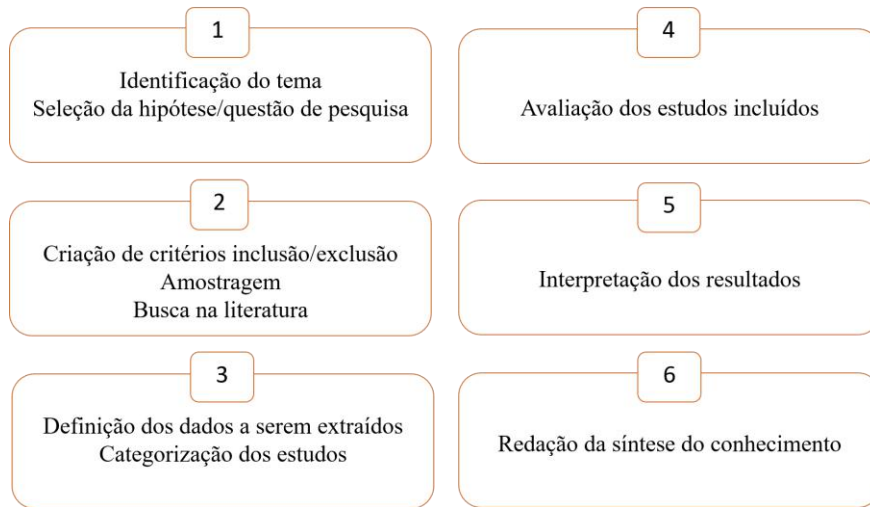
Assim, ressalta-se que o engenheiro químico possui um campo abrangente para sua atuação, desde a criação de novos produtos até os controles de poluição, operacional, ambiental e de qualidade. Atualmente, todas as operações ligadas ao meio ambiente, higiene industrial e com a segurança estão em constante desenvolvimento, fazendo com que o profissional da engenharia química seja essencial para a adequação das empresas à legislação vigente (Cremasco, 2015). Dessa forma, pode-se mencionar as principais especializações do engenheiro químico são em atividades de fabricação de celulose, borrachas, tintas, inseticidas, derivados do petróleo, medicamentos, bebidas e tratamento de esgoto. Neste caso, existem processos de coagulação, decantação, flotação, filtração direta, indireta, ou membranas de ultrafiltração e cada ETE é projetada conforme as características da água a ser tratada. Além disso, são realizadas análises para o controle do processo, como por exemplo, pH, cor, turbidez, flúor e cloro residual livre.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo geral investigar quais são as alternativas tecnológicas sustentáveis para o tratamento de águas residuais disponíveis na literatura recente, bem como qual a atuação do engenheiro químico nesse setor, de modo a contribuir com o desenvolvimento de reflexões sobre o tema.

2. Metodologia

O presente estudo se caracteriza como uma pesquisa de natureza quantitativa com relação à quantidade de artigos como mostra a Figura 2, porcentagens como mostra a Tabela 1 (Pereira, Shitsuka, Parreira & Shitsuka, 2018) e estatística descritiva como apresenta a Quadro 1 com frequências apresentadas pelo número de citações (Shitsuka et al., 2014). Esta revisão é sistemática podendo ser considerada como sendo sistemática e integrativa da literatura e, que desta forma, fornece informações amplas sobre o assunto. e permite analisar e sintetizar resultados de pesquisas já publicadas, com diferentes abordagens metodológicas, sendo baseada em conhecimento científico e, portanto, apresentando resultados confiáveis. Pode ser elaborada com diferentes finalidades e direcionada para a análise de conceitos, a revisão de teorias ou o diagnóstico metodológico dos estudos de um tópico particular (Ercole, Melo & Alcoforad, 2014). Para a construção da revisão integrativa é preciso passar por seis etapas conforme Figura 2.

Figura 2 — Etapas que caracterizam a pesquisa de Revisão Integrativa percorridas no desenvolvimento deste estudo.

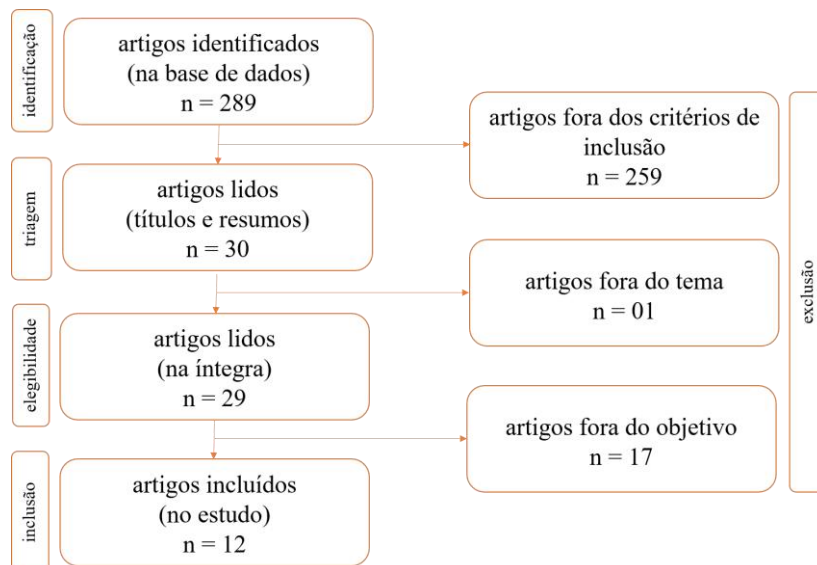


Fonte: Adaptado de Mendes, Silveira & Galvão, 2008.

A revisão integrativa aqui desenvolvida foi guiada pela seguinte questão: Quais são as alternativas tecnológicas sustentáveis para o tratamento de águas residuais apresentadas em publicações recentes com ênfase na contribuição do engenheiro químico para esse setor? O levantamento dos artigos para análise foi feito pelas pesquisadoras de modo independente, por meio da pesquisa avançada à base de dados PubMed, que foi escolhida por apresentar significativo alcance acadêmico e científico na área em estudo. Foi usado o termo de busca *sustainable alternatives for the treatment of water resources* com os filtros texto completo, gratuito e tempo de 1 ano.

O estudo utilizou a metodologia qualitativa e descritiva e buscou um aprofundamento no tema por meio da análise final dos artigos que atenderam aos critérios de inclusão previamente estabelecidos: publicações recentes (2022), em qualquer idioma, disponíveis gratuitamente e na íntegra e que respondessem ao objetivo desse estudo. Foram excluídos artigos repetidos ou que não abordavam diretamente o tema e materiais publicados no formato de resumos, resenhas e dissertações. Na Figura 3 são encontrados os dados relativos à busca do material a ser analisado.

Figura 3 — Resultado da busca pelos artigos científicos a serem analisados.



Fonte: Autoria própria (2023).

Inicialmente foram identificados 289 artigos científicos a partir da pesquisa usando o termo de interesse, em seguida, de acordo com os critérios de inclusão estabelecidos, apenas 30 foram publicados em 2022 e estavam disponíveis gratuitamente. Seguiu-se com a leitura de títulos e dos resumos, o que possibilitou a exclusão de mais um artigo por não corresponder ao escopo da pesquisa, restando, pois, 29 para leitura na íntegra. Isso possibilitou obter como amostra final 12 artigos para análise, os quais discutem de forma pontual os aspectos relevantes sobre a problemática. Esses estão apresentados no Quadro 1 contendo sua identificação, seus dados bibliográficos e o número de citações na data de acesso.

Quadro 1 — Informações sobre os artigos científicos selecionados para análise.

Nº do artigo	Dados bibliográficos	Nº de citações
A01	Barghash, H.; Al Farsi, A.; Okedu, K. E.; Al-Wahaibi, B. M. <i>Cost benefit analysis for green hydrogen production from treated effluent: The case study of Oman</i> . Front Bioeng Biotechnol. 2022.	07
A02	Malik, S.; Dhasmana, A.; Preetam, S.; Mishra, Y. K., Chaudhary, V.; Bera S. P.; Ranjan, A.; Bora, J.; Kaushik, A.; Minkina, T.; Jatav, H. S.; Singh, R. K.; Rajput, V. D. <i>Exploring Microbial-Based Green Nanobiotechnology for Wastewater Remediation: A Sustainable Strategy</i> . Nanomaterials (Basel). 2022.	24
A03	BinSabt, M.; Sagar, V.; Singh, J.; Rawat, M.; Shaban, M. <i>Green Synthesis of CS-TiO2 NPs for Efficient Photocatalytic Degradation of Methylene Blue Dye</i> . Polymers (Basel). 2022.	26
A04	Han, M.; Zhang, C.; Ho, S.H. <i>Immobilized microalgae system: An achievable idea for upgrading current microalgal wastewater treatment</i> . Environ Sci Ecotechnol. 2022.	28
A05	Rufi-Salís, M.; Petit-Boix, A.; Leipold, S.; Villalba, G.; Rieradevall, J.; Moliné, E.; Gabarrell, X.; Carrera, J.; Suárez-Ojeda, M. E. <i>Increasing resource circularity in wastewater treatment: Environmental implications of technological upgrades</i> . Sci Total Environ. 2022.	15
A06	Cheng, X.; Xu, Y.; Lei, Z.; Du, J. <i>Investigation on operational parameters and membrane fouling performance in treating synthetic aquaculture wastewater via forward osmosis with sucrose as draw solution</i> . Sci Total Environ. 2022.	06
A07	Fakioğlu, M.; Kalpaklı, Y. <i>Mechanism and behavior of caffeine sorption: affecting factors</i> . RSC Adv. 2022.	12
A08	Koul, Y.; Devda, V.; Varjani, S.; Guo, W.; Ngo, H. H.; Taherzadeh, M. J.; Chang, J. S.; Wong, J. W. C.; Bilal, M.; Kim, S. H.; Bui, X. T.; Parra-Saldívar, R. <i>Microbial electrolysis: a promising approach for treatment and resource recovery from industrial wastewater</i> . Bioengineered. 2022.	33
A09	Nissanka, B.; Jayasundara, D. R. <i>Nanocomposite of graphene oxide decorated Al-waste sludge for removal of rhodamine B from water</i> . RSC Adv. 2022.	03
A10	Bognár, S.; Putnik, P.; Merkulov, D. S. <i>Sustainable Green Nanotechnologies for Innovative Purifications of Water: Synthesis of the Nanoparticles from Renewable Sources</i> . Nanomaterials (Basel). 2022.	20
A11	Gwandu, T.; Blake, L. I.; Nezomba, H.; Rurinda, J.; Chivasa, S.; Mtambanengwe, F.; Johnson, K. L. <i>Waste to resource: use of water treatment residual for increased maize productivity and micronutrient content</i> . Environ Geochem Health. 2022.	11
A12	Fico, G. C.; de Azevedo, A. R. G.; Marvila, M. T.; Cecchin, D.; de Castro Xavier, G.; Tayeh, B. A. <i>Water reuse in industries: analysis of opportunities in the Paraíba do Sul river basin, a case study in Presidente Vargas Plant, Brazil</i> . Environ Sci Pollut Res Int. 2022.	04

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

3. Resultados e Discussão

Trata-se de uma pesquisa básica e de cunho qualitativo, cujos achados foram agrupados, analisados e discutidos de modo descritivo. Considerando os critérios pré-determinados foram recuperados 12 artigos científicos para análise. Seus dados foram tabulados e registradas suas principais características: objetivos, metodologias e técnicas propostas para o tratamento de águas residuais.

O objetivo das publicações analisadas foi estudar novas técnicas para tratamento de águas residuais analisando sua viabilidade e investigando possibilidades de obtenção de outros produtos. É perceptível que este objetivo está diretamente relacionado à temática em estudo, comprovando a adequação dos critérios de inclusão utilizados no processo seletivo.

No que se refere às metodologias usadas na elaboração dos artigos analisados, verificou-se que a mais utilizada foi a pesquisa de revisão, seguida de pesquisa experimental e estudo de caso, conforme Tabela 1.

Tabela 1 — Metodologias de cada artigo analisado.

Metodologia	Nº do artigo	%
Pesquisa de revisão	A02, A04, A07, A08, A10 e A12	50,00
Pesquisa experimental	A03, A06, A09 e A11	33,33
Estudo de caso	A01 e A05	16,67

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Percebeu-se que grande parte do material selecionado foi publicado em periódicos destinados, principalmente, a profissionais com interesses ambientais, como biólogos, engenheiros e bioengenheiros, apresentando conteúdos informativos e relevantes da área estudada e contribuindo para o aperfeiçoamento da formação e para a atuação destes profissionais.

Por fim, visando discutir as principais características relacionadas ao tema analisado, foi realizada a etapa referente à análise semântica, por meio de análise qualitativa dos achados sobre as alternativas tecnológicas sustentáveis para o tratamento de águas residuais e o papel do engenheiro químico frente aos desafios do SB no Brasil. Verificou-se que as publicações apresentam técnicas que viabilizem o tratamento das águas residuais, conforme apresentado no Quadro 2, caracterizando o interesse em aperfeiçoar o processo.

Quadro 2 — Alternativas tecnológicas sustentáveis para o tratamento de águas residuais.

Nº do artigo	Técnica apresentada
A01	Uso de Biorreator à Membrana, nova tecnologia a partir de um conceito simples de filtração de biomassa que consiste em: área principal de trabalho; área de processo do tratamento biológico; área de tratamento do efluente e unidade de desidratação de lodo.
A02	Uso de abordagens nanotecnológicas (NMs verdes) assistidos por micróbios.
A03	Uso de nanopartículas de dióxido de titânio (NPs CS-TiO ₂) sintetizadas por meio do extrato de folha de cannabis sativa (bhang).
A04	Uso de um sistema de microalgas imobilizadas.
A05	Uso de duas tecnologias emergentes de recuperação de recursos hídricos: BNR autotrófica e EBPR.
A06	Uso de um sistema de osmose direta, um processo de separação por membrana conduzido por um reagente natural, investigando a concentração da solução de extração, a velocidade de fluxo cruzado e a temperatura visando aumentar sua eficiência.
A07	Uso da adsorção como método para remover a cafeína de meios aquosos.
A08	Uso da Célula de Eletrolise Microbiana para a conversão de resíduos em produtos sem poluir o ambiente.
A09	Uso de resíduos sólidos da indústria de anodização de alumínio reciclados e misturados com óxido de grafeno para projetar um material compósito para remoção de corante.
A10	Aplicação de nanomateriais sintetizados.
A11	Aplicação de um tratamento à base de alumínio (Al-WTR), em combinação com composto e fertilizante fosfatado inorgânico, para remoção de nutrientes.
A12	Adoção de práticas de reúso de água para fins não potáveis a partir do tratamento de efluentes.

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Barghash et al. (2022) - A01, estudaram a viabilidade técnica e econômica do tratamento de esgoto com uma finalidade específica: produzir hidrogênio para geração de energia, uma alternativa renovável e limpa. O estudo foi realizado na ETE de Al Ansab, uma vila em Mascate, no nordeste de Omã, na Ásia. Os resultados mostraram que a receita anual usando

sistema convencional era de 7,02 milhões de OMR¹, enquanto que usando o sistema eletrolisador de membrana de troca de prótons para dois casos com capacidades de 1.500 kg H₂/dia e 50.000 kg H₂/dia, produzir receitas de 8,30 milhões de OMR/ano e 49,73 milhões de OMR/ano, respectivamente.

Malik et al. (2022) - A02, avaliaram o uso de nanobiotecnologia baseada em micróbios no tratamento de esgotos, constatando que seu uso pode reduzir a carga química, os bioquímicos que atuam como redutores e os agentes protetores e estabilizadores durante o processo em biorreatores de grandes amostras, se tornando uma tecnologia limpa e sustentável. Portanto, os nanomateriais verdes fabricados com microrganismos emergem como substitutos rentáveis, ecológicos, seguros e eficientes.

BinSabt et al. (2022) - A03, investigaram a mitigação do corante azul de metileno utilizando nanopartículas de dióxido de titânio (NPs CS-TiO₂) sintetizadas usando extrato de folha de *cannabis sativa* (bhong) através de uma abordagem ecológica. Estudos microscópicos confirmaram que a distribuição média do tamanho das partículas individuais foi encontrada na faixa de 12,5 ± 1,5 nm, enquanto o tamanho médio dos agregados de NPs CS-TiO₂ foi de 24,5 ± 11,5 nm. Além disso, as NPs CS-TiO₂ sintetizadas manifestaram notável potencial de degradação fotocatalítica contra o corante azul de metileno com uma eficiência de degradação de 98,2% e uma constante de taxa aparente de 0,0398 min⁻¹. Como resultado, esta pesquisa oferece uma alternativa verde/sustentável para purificação de água.

Han, Zhang e Ho (2022) - A04, propuseram a atualização do atual tratamento de águas residuais de microalgas usando um sistema de microalgas imobilizadas. Eles verificaram que a utilização da imobilização para melhorar ainda mais o tratamento de águas residuais à base de microalgas pode ser reconhecida como uma alternativa viável para tornar o tratamento de águas residuais com microalgas mais realista.

Rufi-Salís et al. (2022) - A05, conduziram uma avaliação do ciclo de vida de tecnologias emergentes de tratamento de águas residuais com o objetivo de aumentar a circularidade de recursos em estações de tratamento de águas residuais. Compararam a sua configuração atual com (i) a implementação da remoção autotrófica de azoto no fluxo principal e a obtenção da maior parte da matéria orgânica para a produção de biogás, o que aumenta a qualidade e a quantidade de biogás disponível para a produção de energia; (ii) implementação da recuperação de estruvita através da remoção biológica melhorada de fósforo (EBPR) como uma abordagem radical à gestão do fósforo, oferecendo uma alternativa aos fertilizantes minerais e (iii) uma combinação de ambas as abordagens. Os resultados mostraram que mudanças incrementais na produção de biogás são insuficientes para compensar o investimento ambiental em infraestrutura, embora a remoção autotrófica de nitrogênio seja benéfica para aumentar a qualidade do efluente. A combinação de fósforo e recuperação de energia reduz os impactos ambientais decorrentes da utilização de fertilizantes e fósforo e da libertação de azoto nas massas de água. Uma abordagem integrada é, portanto, desejável e cria novas oportunidades para a implementação de estratégias circulares com baixo impacto ambiental nas cidades.

Cheng et al. (2022) - A06, avaliaram o tratamento de águas residuais da aquicultura utilizando um sistema osmose direta. Investigaram a concentração da solução de extração, a velocidade de fluxo cruzado e a temperatura do extrato visando aumentar a eficiência de funcionamento. Verificaram que o emprego de sacarose como solução de extração foi eficaz na redução do volume de águas residuais e proporcionou uma escolha alternativa e sustentável para a separação de poluentes orgânicos dos recursos hídricos, confirmando que era uma abordagem promissora para o tratamento de águas residuais.

Fakioğlu e Kalpaklı (2022) - A07, apresentaram interesse sobre o desenvolvimento de métodos alternativos para o tratamento da água, especificamente na remoção da cafeína através de um sistema de adsorção, tendo em vista que seu consumo por vias indiretas (como de plantas, animais e águas) pode causar sérios problemas de saúde e danos ambientais

¹ OMR (Rial de Omã): Moeda usada em Omã, país em que a pesquisa foi realizada.

irreversíveis. Observaram que (i) o desenvolvimento de adsorventes ecológicos e de alta capacidade em processos sustentáveis e econômicos está aumentando e que a cafeína é adsorvida de forma mais eficiente em um ambiente ácido; (ii) os resultados foram mais eficazes à temperatura ambiente (298 K); (iii) os valores da capacidade máxima de adsorção variam em uma ampla faixa, como 5 a 395 mg g⁻¹; (iv) entre as isotermas de adsorção de equilíbrio estudadas, o modelo de isoterma de Langmuir apresentou a melhor concordância com os dados experimentais obtidos na adsorção de cafeína na maioria dos estudos e (v) o mecanismo de ligação foi estabelecido devido às partes negativas do carbosilicato na superfície adsorvente e os grupos amino carregados positivamente das moléculas de cafeína são locais ativos, e a adsorção da cafeína também ocorre através da atração eletrostática.

Koul et al. (2022) - A08, investigaram o uso da célula de eletrólise microbiana associada a outros processos, como sistema acoplado de digestão anaeróbica, biorreator de membrana anaeróbica e microconversor termoelétrico. Verificaram que existem obstáculos termodinâmicos que dificultam a obtenção de melhores resultados, além de questões relativas à viabilidade industrial, aos desafios econômicos e ao controle e monitoramento de processos. Concluíram que o uso das células de eletrólise microbiana se mostrou um grande potencial pois reduziu a poluição no fluxo de águas residuais; (ii) auxiliou na recuperação de recursos dos efluentes industriais; (iii) reduziu a matéria biodegradável no fluxo e (iv) contribuiu com a geração de eletricidade e hidrogênio, que é usado como combustível limpo.

Nissanka e Jayasundara (2022) - A09, os autores abordaram particularmente uma metodologia para remoção de corantes utilizados em aplicações em larga escala, através de nanocompostos e com remoção eficiente nessas águas residuais. Descreveram a preparação de um compósito comercialmente viável a partir de lodo residual de hidróxido de alumínio descartado da indústria de anodização e óxido de grafeno, e sua aplicação para a remoção de rodamina B (RhB), um corante catiônico sintético solúvel em água e amplamente utilizado como corante. Neste método, a lama de hidróxido de alumínio reciclada é misturada com uma quantidade mínima de óxido de grafeno e depois reduzida termicamente a óxido de grafeno parcialmente reduzido (pGO) dentro da mistura. Este composto de lama porosa de hidróxido de alumínio com pGO favorece o efeito sinérgico de alta área superficial, preservando a hidrofiliabilidade e melhorando a capacidade de adsorção do corante. Portanto, este compósito pode ser utilizado como um potencial adsorvente para remoção eficiente de corantes em aplicações em larga escala.

Para Bognár, Putnik e Merkulov, (2022) - A10, os métodos convencionais de tratamento de águas residuais não conseguem remover efetivamente poluentes como medicamentos, corantes orgânicos e pesticidas. Assim, eles propuseram uma alternativa promissora e sustentável, a fotocatalise heterogênea, que se baseia na interação entre a irradiação de luz e os semicondutores como fotocatalisadores, mas esses compostos apresentam desvantagens. Visando minimizar essas desvantagens os autores propuseram associar ao de nanotecnologia. No entanto, apesar de que a aplicação da fotocatalise heterogênea somada à nanotecnologia verde é o futuro na purificação de água, existem desafios a serem superados: o alto valor financeiro do processo e dos equipamentos de segurança; os fatores que afetam a eficiência da fotocatalise e as técnicas para síntese de nanomateriais são difíceis e exigem quantidade significativa de produtos nocivos, o que polui adicionalmente o meio ambiente.

Gwandu et al. (2022) - A11, inferem sobre o uso de resíduos do tratamento de águas residuais para aumentar a produção de milho e do teor de micronutrientes nestas plantações. Neste estudo, realizou-se o tratamento da água à base de alumínio, que ao combinar-se com compostos de fertilizantes fosfatados presentes no solo, aumentam a produtividade e a absorção de nutrientes, melhorando a qualidade do grão de milho.

Fico et al. (2022) - A12, analisaram a captação de água pelas indústrias em uma região específica do Rio de Janeiro por meio de indicadores e relatórios de sustentabilidade fornecidos pelas empresas. Eles verificaram que devido à escassez mundial de água, há uma forte tendência de reuso de água apesar do valor alto como custo médio de implantação de uma

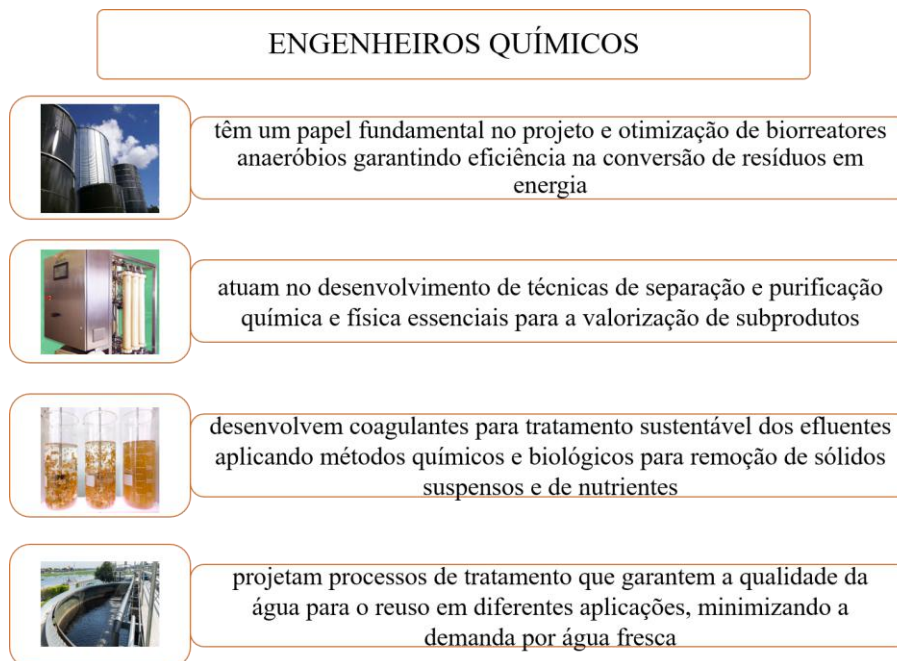
unidade de para indústria no estado do Rio de Janeiro. Concluíram que no referido estado há uma ameaça de escassez hídrica que, em um futuro próximo poderá ser agravada caso não sejam adotados investimentos em alternativas de reuso de água.

Desse modo, são diversificadas as técnicas usadas no tratamento de águas residuais. De acordo com os artigos analisados quatro adotaram abordagens nanotecnológicas: nanobiotecnologia (A02), nanopartículas de dióxido de titânio (A03), lodo residual + óxido de grafeno (A09) e fotocatalise heterogênea somada à nanotecnologia verde (A10). Os oito restantes usaram uma das seguintes técnicas: biorreator (A01); sistema de microalgas imobilizadas (A04); tecnologia BNR autotrófica integrada à EBPR (A05); osmose direta (A06); adsorção (A07); célula de eletrólise microbiana (A08); uso de resíduos no tratamento visando aumentar absorção de nutrientes pelo milho (A11) e reuso da água para fins não potáveis (A12).

Existem, portanto, diferentes alternativas tecnológicas sustentáveis demonstrando respeito do setor com a legislação sobre o manejo adequado das águas residuais que exige que os rejeitos devem ser tratados de maneira a evitar contaminação do solo e da água, além de promover a reciclagem e o reaproveitamento quando possível (Brasil, 2005). Dessa forma, fica evidente que o saneamento é uma preocupação de várias áreas, seja para escolha da melhor alternativa de tratamento ou em finalidades específicas. Ressalta-se ainda a diversidade de trabalhos relacionados ao tema, os quais propõem melhorias para os processos do tratamento de águas residuais.

Quanto ao papel do engenheiro químico frente aos desafios inerentes a esse tema, verificou-se que sua atuação abrange desde a otimização dos processos de tratamento de água e de esgoto até a realização do controle das operações envolvendo os níveis de pH, cloro, sólidos totais e outros parâmetros importantes para determinação da qualidade da água (Moreira & Silva, 2024). Isso reforça que a engenharia química é uma área com vasta diversidade de setores para atuação, sendo uma delas a de SB conforme exemplificado na Figura 4.

Figura 4 — Exemplos de setores de atuação para os engenheiros químicos.



Fonte: Adaptado de Moreira e Silva (2024).

4. Considerações Finais

As alternativas tecnológicas sustentáveis para o tratamento de águas residuais têm sido propostas e discutidas em publicações recentes. Algumas incluem uso de biorreatores resultando na produção de biogás, a valorização de subprodutos, a aplicação de métodos químicos e biológicos para a remoção de sólidos suspensos e de nutrientes e as tecnologias de reuso da água.

O engajamento de profissionais da engenharia química, que elaboram e executam projetos em conformidade com as leis ambientais e dominam a otimização de processos, é determinante para o sucesso da gestão de soluções relacionadas às inovações sustentáveis das águas residuais, promovendo a engenharia da química verde.

Com este estudo espera-se contribuir com o desenvolvimento de reflexões sobre o tema junto a instituições de ensino que promovem a formação acadêmica desses profissionais, ao evidenciar, na prática, os conteúdos estudados no ambiente escolar. Acrescenta-se a necessidade de fornecendo maior visibilidade para a correlação SB e saúde coletiva, um tema de alta relevância social, uma vez os serviços de SB constituem a essência do direito à saúde. No entanto, considera-se a existência de limitações durante sua elaboração, como o número de artigos selecionados foi inferior ao que, em princípio, se estimou; a busca ter sido realizada apenas em um banco de dados e os descritores utilizados se limitaram a um termo. Futuros estudos podem, portanto, realizar uma análise mais abrangente dos achados para incluir outras inovações tecnológicas de tratamento de águas residuais que sejam projetadas para atender demandas mais universais.

Referências

- Bittencourt, C., & Paula, M. A. S. D. (2014). *Tratamento de água e efluentes: fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos*. Grupo GEN. Recuperado de <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788536521770>
- Brasil. (2005). Conselho Nacional de Meio Ambiente. CONAMA. Resolução n° 357, de 17 de março de 2005. *Estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes*. DOU, Brasília – DF, de 18 de março de 2005.
- Brasil. (2020). Painel Saneamento Brasil. *Indicadores por ano*. <https://www.painelsaneamento.org.br/saneamento-mais-por-ano?id=1&S%5Bid%5D=0>
- Brasil. (2022). Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. *Plano Nacional de Saneamento Básico*. <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab#:~:text=O%20Plano%20Nacional%20de%20Saneamento,o%20horizonte%20de%2020%20anos>
- BRK Ambiental. (2020). *Saneamento em pauta*. <https://blog.brkambiental.com.br/saneamento-basico-e-saude-publica/>
- Centro de Liderança Pública. CLP. (2024). *A relação entre saneamento básico e saúde ambiental*. <https://clp.org.br/a-relacao-entre-saneamento-basico-e-saude-ambiental/>
- Conselho Federal de Química. CFQ. (2021). *A química pode contribuir para melhorias no tratamento da água*. <https://cfq.org.br/noticia/a-quimica-pode-contribuir-para-melhorias-no-tratamento-da-agua/>
- Cremsco, M. A. (2015). *Vale a pena estudar Engenharia Química*. Editora Blucher.
- D'Agostin, A., Becegato, V. A., & Baum, C. A. (2017). Revisão sobre técnicas e tratamentos de águas para reúso doméstico. *Geoambiente On-Line*, (28), 1-15.
- Díaz, R. R. L., & Nunes, L. dos R. (2020). A evolução do saneamento básico na história e o debate de sua privatização no Brasil. *Revista de Direito da Faculdade Guanambi*, 7(2), 1-23.
- Ercole, F. F., Melo, L. S., & Alcoforado, C. L. G. C. (2014). Revisão Integrativa versus Revisão Sistemática. *REME: Revista Mineira de Enfermagem*, 18(1), 1-260.
- Fonseca, A. R. (2008). *Tecnologias sociais e ecológicas aplicadas ao tratamento de esgotos no Brasil*. (Dissertação de Mestrado). Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca da Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro.
- Heller, L. (1998). Relação entre saúde e saneamento na perspectiva do desenvolvimento. *Ciência & Saúde Coletiva*, 3(2), 73-84.
- Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia. INCT. (2019a). *A importância da engenharia no saneamento básico*. Recuperado de <https://etes-sustentaveis.org/engenharia-no-saneamento-basico-2/>
- Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia. INCT. (2019b). *Por que o Brasil é tão atrasado no saneamento básico?* <https://etes-sustentaveis.org/por-que-brasil-atrasado-saneamento/#:~:text=Pol%C3%ADticas%20p%C3%ABlicas%20ineficientes%20e%20processos,%20mantenha%20atrasado%20no%20pa%C3%ADs>

- Instituto Trata Brasil. ITB. (2021). *Esgoto*. <https://tratabrasil.org.br/principais-estatisticas/esgoto/>
- Instituto Trata Brasil. ITB. (2022). *Dia Mundial dos Oceanos: Brasil despeja 5,3 mil piscinas olímpicas de esgoto sem tratamento diariamente na natureza* <https://tratabrasil.org.br/dia-mundial-dos-oceanos-brasil-despeja-53-mil-piscinas-olimpicas-de-esgoto-sem-tratamento-diariamente-na-natureza/>
- Instituto Trata Brasil. ITB. (2023a). *Com quase 35 milhões de habitantes sem água, Brasil precisará mais que dobrar investimentos para universalizar o saneamento*. <https://tratabrasil.org.br/com-quase-35-milhoes-de-habitantes-sem-agua-brasil-precisara-mais-que-dobrar-investimentos-para-universalizar-o-saneamento/>
- Instituto Trata Brasil. ITB. (2023b). *Ranking do saneamento: 100 maiores cidades brasileiras*. <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2023/03/Resumo-Executivo-digital-FINAL.pdf>
- Instituto Trata Brasil. ITB. (2024) *Confirma a atualização do Painel Saneamento Brasil*. <https://tratabrasil.org.br/confirma-a-atualizacao-do-painel-saneamento-brasil/>
- Lahoz, R. A. L. (2018). *Serviços públicos de saneamento básico e saúde pública no Brasil*. Grupo Almedina. <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788584933778>
- Leoneti, A. B., Prado E. L. do, & Oliveira, S. V. W. B. de (2011). Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI. *RAP: Revista de Administração Pública*, 45(2), 331-48.
- Mendes, K. D. S., Silveira, R. C. C. P., & Galvão, C. M. (2008). Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. *Texto Contexto Enfermagem*, 17(4), 758-64.
- Mesquita, T. C. R., Rosa, A. P., Gomes, U. A. F., & Borges, A. C. (2021). Gestão descentralizada de soluções de esgotamento sanitário no Brasil: Aspectos conceituais, normativos e alternativas tecnológicas. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, (56), 46-66.
- Moreira, E. M. da S. & Silva, J. D. P da. (2024). Gestão de resíduos líquidos e sólidos gerados em processos de laticínios: provocações para o engenheiro químico. *Revista Foco Interdisciplinary Studies*, 17(10), e6540, 01-25.
- Nascimento, N. O., & Heller, L. (2005). Ciência, tecnologia e inovação na interface entre as áreas de recursos hídricos e saneamento. *Engenharia sanitária e ambiental*, (10), 36-48.
- Pereira A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. Editora UAB/NTE/UFMS.
- Rosa, A., Bizetto, D. C., Svenar, S., Schimaleski, A. P. C., & Pedro, B. L. (2020). A contribuição de sistemas de tratamento de esgotos por zonas de raízes para gestão de recursos hídricos na região metropolitana de Curitiba. *Brazilian Journal of Development*, 6(4), 17794-17805.
- São Paulo (2009). Secretaria de Estado da Saúde. Coordenadoria de Controle de Doenças. Centro de Vigilância Epidemiológica. Divisão de Doenças de Transmissão Hídrica e Alimentar. *Doenças relacionadas à água ou de transmissão hídrica: Perguntas e Respostas e Dados Estatísticos*. Informe técnico. 25 p.
- Shitsuka, R., Shitsuka, R. I. C. M.; Shitsuka, D. M. & Shitsuka, C. D. W. M. (2014). *Matemática fundamental para tecnologia*. (2. ed.). Editora Erica.
- World Health Organization. WHO. 2017. *Inheriting a sustainable world? Atlas on children's health and the environment*. Geneva: WHO.