



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB  
CENTRO DE TECNOLOGIA – CT  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL – DECA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SÁVIO VERÍSSIMO DOS SANTOS

TECNOLOGIAS SOCIAIS NO ESGOTAMENTO SANITÁRIO RURAL: UMA  
REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SISTEMAS DESCENTRALIZADOS

João Pessoa – PB  
2026

SÁVIO VERÍSSIMO DOS SANTOS

TECNOLOGIAS SOCIAIS NO ESGOTAMENTO SANITÁRIO RURAL: UMA  
REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SISTEMAS DESCENTRALIZADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos obrigatórios para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr<sup>a</sup>. Carmem Lúcia Moreira Gadelha

João Pessoa – PB

2026

## FICHA CATALOGRÁFICA

### Catologação na publicação Seção de Catologação e Classificação

S237t Santos, Savio Verissimo Dos.  
Tecnologias sociais no esgotamento sanitário rural:  
uma revisão sistemática sobre sistemas descentralizados  
/ Savio Verissimo Dos Santos. - João Pessoa, 2026.  
57 f. : il.

Orientação: Carmem Lúcia Moreira Gadelha Gadelha.  
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. saneamento rural; esgotamento sanitário;  
tecnologi. I. Gadelha, Carmem Lúcia Moreira Gadelha.  
II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 62:504(043.2)

## FOLHA DE APROVAÇÃO

SÁVIO VERÍSSIMO DOS SANTOS

### TECNOLOGIAS SOCIAIS NO ESGOTAMENTO SANITÁRIO RURAL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE SISTEMAS DESCENTRALIZADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 01/04/2026 perante a seguinte  
Comissão Julgadora:

_____ Prof. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Carmem Lucia Moreira Gadelha Orientadora Departamento de Engenharia Civil e Ambiental	_____ (Aprovado/Reprovado)
_____ Prof. Dr. Antônio da Silva Sobrinho Júnior Examinador Departamento De Arquitetura e Urbanismo	_____ (Aprovado/Reprovado)
_____ Eng. José Vicente Damante Ângelo e Silva Examinador externo	_____ (Aprovado/Reprovado)
_____ Profa. Aline Flavia Nunes Remigio Antunes Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental	

## DEDICATÓRIA

“Se você quer ser bem-sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si”.

Ayrton Senna da Silva

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, fonte de toda sabedoria, força e direção, por ter me sustentado ao longo desta caminhada acadêmica. Sem a sua graça, misericórdia e providência, nada disso seria possível. Foi ele quem me concedeu saúde, perseverança e discernimento nos momentos mais desafiadores, sendo meu refúgio e inspiração em todos os dias desta jornada.

Aos meus pais, Rosineide e Saulo, expresso minha eterna gratidão pelo amor incondicional, pelos ensinamentos, pelo caráter que me transmitiram e por todo o esforço realizado para que eu pudesse alcançar meus objetivos. Vocês são minha base, meu exemplo de dedicação e honestidade, e esta conquista também pertence a vocês. A minha companheira, Gerlane, agradeço pelo apoio constante, pelo incentivo e pela compreensão nos momentos de ausência e dedicação intensa aos estudos.

À minha orientadora, Carmem Lúcia Moreira Gadelha, manifesto minha sincera gratidão pela orientação segura, pela dedicação, pela confiança depositada em mim e pelas valiosas contribuições acadêmicas que enriqueceram este trabalho. Sua experiência e comprometimento foram essenciais para a concretização deste TCC. Aos meus amigos, especialmente Lucas e Emanuel, agradeço pela amizade verdadeira, pelo companheirismo e pelo apoio durante toda essa trajetória. Estendo também minha gratidão a Luiz Eduardo, Israel, Kennet, Heuller, Luis Henrique e Ronaldo bem como a todos os demais amigos que, de alguma forma, contribuíram com incentivo, palavras de motivação e momentos de descontração que tornaram essa caminhada mais leve.

## RESUMO

O saneamento básico constitui um dos principais determinantes da saúde pública e da qualidade de vida, sendo que sua deficiência é mais acentuada nas áreas rurais, onde predominam limitações estruturais, financeiras e institucionais. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sistemática sobre as inovações tecnológicas e as tecnologias sociais aplicadas ao esgotamento sanitário rural, com ênfase em sistemas descentralizados e de baixo custo. A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliométrica nas bases de dados *Web of Science* e *Scopus*, considerando publicações no período de 2015 a 2024. Os dados foram tratados com o auxílio do software *Bibliometrix*, permitindo a análise de indicadores como evolução temporal das publicações, países mais produtivos, autores com maior número de trabalhos e redes de coocorrência de palavras-chave. Inicialmente foram identificados 1.090 artigos, dos quais 18 foram selecionados para análise aprofundada após aplicação de critérios de inclusão e exclusão. Os resultados evidenciam crescimento expressivo da produção científica a partir de 2021, com destaque para Estados Unidos, China, Reino Unido, Índia e Brasil. A análise temática revelou três eixos principais: eficiência na remoção de poluentes, gestão sustentável dos sistemas de saneamento e abordagens integradas emergentes. Entre as tecnologias mais recorrentes destacam-se *wetlands* construídos, tanques de evapotranspiração e fossas sépticas biodigestoras, reconhecidas por sua viabilidade técnica, baixo custo e adequação às realidades rurais. Conclui-se que as tecnologias sociais representam alternativas estratégicas para a universalização do saneamento rural, integrando sustentabilidade ambiental, inclusão social e participação comunitária.

**Palavras-chave:** saneamento rural; esgotamento sanitário; tecnologias sociais; sistemas descentralizados; sustentabilidade.

## ABSTRACT

Basic sanitation is one of the main determinants of public health and quality of life, and its deficiency is more pronounced in rural areas, where structural, financial, and institutional limitations prevail. In this context, this study aims to conduct a systematic review of technological innovations and social technologies applied to rural wastewater management, with emphasis on decentralized and low-cost systems. The methodology consisted of a bibliometric review using the Web of Science and Scopus databases, covering publications from 2015 to 2024. Data were analyzed using the Bibliometrix software, enabling the evaluation of indicators such as temporal evolution of publications, most productive countries, leading authors, and keyword co-occurrence networks. Initially, 1,090 articles were identified, and 18 were selected for in-depth analysis after applying inclusion and exclusion criteria. The results indicate a significant increase in scientific production from 2021 onwards, with notable contributions from the United States, China, the United Kingdom, India, and Brazil. The thematic analysis revealed three main axes: pollutant removal efficiency, sustainable sanitation system management, and emerging integrated approaches. The most recurrent technologies include constructed wetlands, evapotranspiration tanks, and biogasifier septic tanks, recognized for their technical feasibility, low cost, and suitability for rural contexts. It is concluded that social technologies represent strategic alternatives for achieving universal rural sanitation by integrating environmental sustainability, social inclusion, and community participation.

**Keywords:** rural sanitation; wastewater management; social technologies; decentralized systems; sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de saneamento básico .....	15
Figura 2 – Partes íntegras do saneamento rural .....	18
Figura 3 – Representação de Tanque de Evapotranspiração .....	27
Figura 4 – Representação de perfil de um <i>Wetland</i> .....	28
Figura 5 – Representação de uma fosse séptica .....	30
Figura 6 – Fluxograma sobre revisão bibliométrica.....	32
Figura 7 – Gráfico de quantidade de publicações em razão do ano de acordo com a revisão bibliométrica.....	36
Figura 8 – Distribuição de autores com o maior número de publicações .....	37
Figura 9 – Nuvem de palavras dos termos mais citados na revisão bibliométrica ...	38
Figura 11 – Publicações em relação ao país de origem representada em mapa <i>mundi</i> .....	42

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Os sete países com maior número de publicações científicas, considerando o país de origem .....	40
Tabela 2 – Título, autor e ano de lançamento das publicações presentes na revisão bibliométrica .....	43

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1 Objetivo Geral.....	13
2.2 Objetivos Específicos.....	14
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
3.1 Saneamento .....	15
3.1.1 Saneamento Rural.....	17
3.1.2 Saneamento Ambiental.....	21
3.2 Saúde Ambiental.....	21
3.3 Tecnologia Social como Alternativa para Tratamento de Esgoto .....	24
3.3.1 Tipos de Tecnologias Sociais para Tratamento de Esgoto.....	26
3.3.1.1 <i>Tanque de evapotranspiração (TEvap)</i> .....	26
3.3.1.2 <i>Wetlands</i> .....	27
3.3.1.3 <i>Fossa Séptica Biodigestora</i> .....	29
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>32</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>35</b>
5.1 Avanços Tecnológicos sobre Sistemas de Tratamento.....	45
5.2 Tecnologias para o Saneamento Rural no Brasil.....	48
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>50</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico é fundamental para a saúde e a qualidade de vida humana. No entanto, o Brasil enfrenta uma situação crítica em relação ao seu atendimento, especialmente nas áreas rurais e em territórios de povos e comunidades tradicionais. A escassez de infraestruturas e instalações necessárias para promover a saúde pública expõe pessoas a riscos elevados de contaminação por esgoto não tratado. O descarte inadequado de esgoto nos solos ou corpos hídricos pode resultar em sérios problemas de saúde, ao propagar organismos patogênicos provenientes de indivíduos infectados (Macedo *et al.*, 2025).

Os sistemas tradicionais de tratamento de esgoto são, em geral, caros, exigem grandes investimentos financeiros e demandam áreas extensas para instalação. Além disso, eles apresentam complexidades tanto na construção quanto na operação, tornando-os economicamente, socialmente e ambientalmente inviáveis em áreas rurais.

Dessa forma, a edição da Lei Federal 11.445/2007, do Marco Regulatório, foi um passo importante para o estabelecimento de diretrizes nacionais para o saneamento básico no Brasil. Sancionada em 2020 a Lei 14.026, conhecida como o Novo Marco Legal do Saneamento Básico, tem como objetivo a universalização do saneamento até 2033, com a regionalização do serviço e a ampliação da participação de empresas privadas (Brasil, 2007; Brasil, 2020). Vale salientar, então, que a Lei nº 11.445/2007 não foi revogada pela nova Lei, mas alterada e muito dos conceitos se mantêm, mas agora sobre uma nova estrutura – eixos estruturantes –, com metas de universalização no texto da Lei e um forte incentivo à regionalização da gestão do saneamento básico.

Nas áreas rurais, a distância e os elevados custos para a instalação, operação e manutenção de redes dificultam coleta e o destino adequado e tratamento dos esgotos. Como resultado, muitas famílias recorrem a soluções alternativas individuais, como fossas sépticas, que, embora mais acessíveis, não são totalmente eficazes no tratamento do esgoto e podem comprometer o lençol subterrâneo. Isso implica na necessidade urgente de explorar outras soluções que sejam simples, sustentáveis e que preservem o meio ambiente, melhorando, ao mesmo tempo, a qualidade de vida das populações (Martinetti; Shimbo; Teixeira, 2007).

Além do problema com os esgotos, a falta de acesso à água potável, nas zonas rurais afeta diretamente a saúde pública e perpetua um ciclo de pobreza e exclusão. Nesses locais, a ausência de infraestrutura de saneamento contribui para a degradação ambiental e a contaminação das fontes de abastecimento de água; (Gomes; Britto, 2024). Acarretam também sérios problemas de saúde, especialmente entre as crianças, e aumentam a contaminação dos mananciais de água (Funasa, 2016).

De acordo com dados do IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), são aproximadamente 29,9 milhões de pessoas residentes nas áreas rurais, o que representa cerca de 8,1 milhões de domicílios. Em apenas 49,9% deles a fossa séptica é usada no tratamento dos esgotos. No restante dos domicílios as soluções são, em geral, ambientalmente inadequadas.

Nesse contexto, tem ocorrido a busca por soluções alternativas às fossas sépticas que sejam além de técnica e economicamente viáveis, ambientalmente adequada e acessível para as populações das áreas rurais.

Este estudo visa investigar tecnologias alternativas às fossas sépticas aplicadas ao esgotamento sanitário rural, por meio de uma revisão sistemática da literatura. A pesquisa foi realizada utilizando as bases de dados Web of Science e Scopus, com foco em artigos publicados entre 2015 e 2024. Além disso, foi utilizado o software Bibliometrix, de código aberto, para a análise bibliométrica e o Excel para a organização e compilação dos dados, visando identificar as principais tendências e contribuições no campo do saneamento rural.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar uma revisão sistemática sobre as tecnologias sociais usadas para o esgotamento e tratamento sanitário rural, com foco em sistemas descentralizados analisando suas contribuições para a sustentabilidade, acessibilidade e adequação a comunidades rurais.

## 2.2 Objetivos específicos

- Analisar a produção científica existente sobre o tema, com ênfase na problemática da falta de esgotamento sanitário rural, no período de 2015 a 2024.
- Identificar as tecnologias sociais aplicadas ao esgotamento sanitário rural, com ênfase em sistemas descentralizados e de baixo custo.
- Analisar os benefícios e desafios da implementação dessas tecnologias sociais em áreas rurais, encontradas nas produções científicas, considerando sua viabilidade técnica, impacto social e ambiental.
- Fazer uma análise comparativa entre as tecnologias sociais abordadas considerando os aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo é dividido em seis seções: **Saneamento**, que aborda seus princípios e relevância para o meio ambiente e saúde; **Saneamento Rural**, que discute desafios nas áreas rurais; **Saneamento Ambiental**, focando na integração com a gestão de recursos e controle da poluição; **Saúde Ambiental e Sustentabilidade**, que analisa a relação entre ambiente, saúde pública e desenvolvimento sustentável; **Tecnologia Social para o Tratamento de Esgoto**, que apresenta soluções acessíveis para pequenas comunidades; e, por fim, **Tipos de Tecnologias Sociais**, que descreve e classifica modelos de tratamento de esgoto em diversos contextos.

#### 3.1 Saneamento

O saneamento compreende um conjunto de ações voltadas à preservação e à transformação das condições ambientais, com o objetivo de prevenir doenças, promover a saúde pública, elevar a qualidade de vida da população e contribuir para o aumento da produtividade individual, ao mesmo tempo em que favorece o desenvolvimento econômico (Ferreira; Garcia, 2017). Ao longo do tempo, o conceito de saneamento passou por diferentes interpretações, influenciadas por fatores como o contexto cultural, a situação socioeconômica, o nível de informação disponível e a forma como a sociedade se relaciona com o meio ambiente (Funasa, 2019). A Figura 1 apresenta o esquema de saneamento básico elaborado a partir a bibliografia especializada.

**Figura 1** - Esquema de saneamento básico



**Fonte:** gestão urbana (2026)

De acordo com a OMS - Organização Mundial da Saúde, o saneamento básico refere-se ao controle dos fatores ambientais que possam exercer impactos negativos sobre o bem-estar físico, mental e social da população (BRASIL, 2004). Nesse sentido, os serviços de saneamento básico englobam o abastecimento e tratamento de água, a coleta e o tratamento de esgoto sanitário, a limpeza urbana, o manejo de resíduos sólidos, bem como a drenagem e o controle das águas pluviais, sendo elementos fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental das regiões (Cabedo Júnior *et al.*, 2018).

A concepção clássica de saneamento, fundamentada nas diretrizes da OMS, define-o como o controle de todos os fatores que possam causar prejuízos ao bem-estar humano, conforme destacado por Heller (1998). No contexto brasileiro, a Lei Federal nº 11.445/2007, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e para sua política federal, amplia essa definição ao caracterizar o saneamento básico como o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais relacionadas ao abastecimento de água potável, ao esgotamento sanitário, à limpeza urbana e ao manejo de resíduos sólidos, além da drenagem e manejo das águas pluviais (Brasil, 2007).

Dessa forma, o saneamento básico deve ser compreendido como uma política pública essencial, diretamente associada às necessidades diárias da população e à garantia de acesso equitativo e progressivo aos serviços, em consonância com o conceito de segurança hídrica. A carência desses serviços compromete a saúde, o bem-estar e o desenvolvimento social, impactando, negativamente, áreas como educação, trabalho e qualidade de vida, e aprofundando desigualdades entre os grupos sociais que possuem ou não acesso adequado ao saneamento (Whately *et al.*, 2021).

O Marco Regulatório do Saneamento Básico no Brasil tem como base a Constituição Federal de 1988, a qual define a repartição de competências entre os entes federativos. Cabe à União a formulação de diretrizes gerais para o desenvolvimento urbano, abrangendo o saneamento básico, enquanto estados, municípios e o Distrito Federal atuam de forma conjunta na implementação de políticas e programas relacionados à habitação e ao saneamento (Brasil, 1988).

No âmbito local, os municípios possuem a atribuição de legislar sobre assuntos de interesse local e de organizar a prestação dos serviços públicos, incluindo os serviços de saneamento básico, que podem ser executados

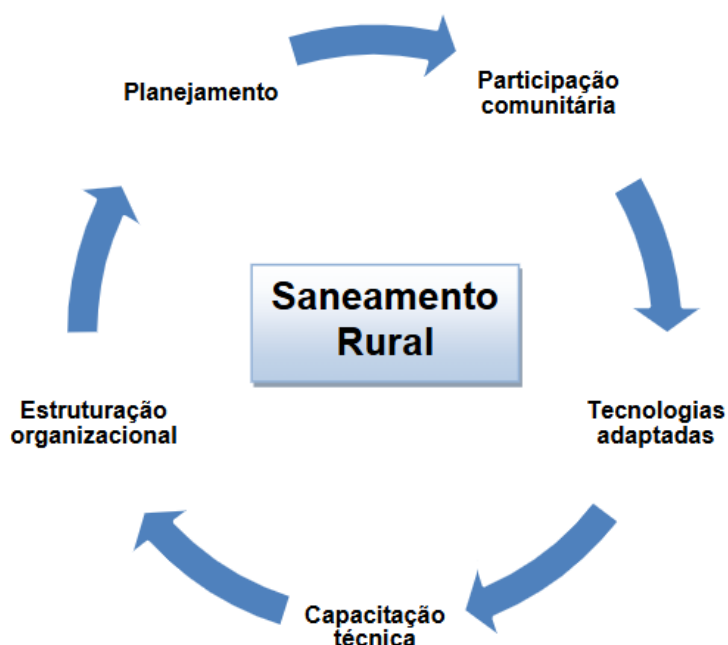
diretamente ou por meio de concessões. Entretanto, devido às características técnicas dos sistemas de saneamento e à necessidade de viabilidade econômica e sustentabilidade financeira, o setor ultrapassa os limites do interesse exclusivamente municipal, demandando articulação e coordenação entre as diferentes esferas de governo. Essa cooperação interfederativa é essencial para o alinhamento de políticas públicas, estratégias de financiamento e superação de conflitos de natureza política e ideológica entre os entes federados (Capanema, 2022).

A conformação institucional do setor de saneamento no país foi fortemente influenciada por iniciativas implementadas a partir da década de 1960, destacando-se o Planasa - Plano Nacional de Saneamento e a atuação do BNH - Banco Nacional da Habitação. Essas ações buscaram centralizar a prestação dos serviços nas companhias estaduais de saneamento, com o objetivo de assegurar a autossustentação financeira do setor e reduzir o déficit de acesso aos serviços. Apesar de o arcabouço regulatório brasileiro incorporar fundamentos econômicos e financeiros consistentes, sua efetividade historicamente tem sido impactada por condicionantes e instabilidades de ordem política (Carvalho, 2021).

### 3.1.1 Saneamento Rural

Um dos fatores centrais para a promoção da saúde da população está associado ao conjunto de ações tradicionalmente compreendidas sob o conceito de saneamento básico. Com relação ao meio rural, os elementos fundamentais para o sucesso das ações de saneamento envolvem um conjunto articulado de fatores que integram planejamento, participação comunitária, tecnologias adequadas, capacitação técnica e estrutura organizacional como pode ser visto na Figura 2, de acordo com a Funasa - Fundação Nacional de Saúde. O planejamento é essencial para orientar a gestão dos serviços, definir prioridades, estabelecer metas e organizar recursos, sempre com base em diagnósticos da realidade local e em processos participativos que fortaleçam a relação entre gestores e comunidade e contribuam para a sustentabilidade das intervenções.

**Figura 2** – Partes íntegras do saneamento rural



**Fonte:** Funasa, 2017

A mobilização social e a participação da comunidade constituem dimensões centrais para a efetividade das ações, pois favorecem o empoderamento dos moradores e ampliam o acesso ao saneamento. Esse envolvimento pode ocorrer na tomada de decisões, na escolha de tecnologias e modelos de gestão, na execução das obras e na manutenção das instalações, além de incentivar práticas sanitárias no cotidiano das famílias. Paralelamente, a adoção de tecnologias compatíveis com as condições locais permite maior autonomia das comunidades para operar e manter os sistemas, utilizando recursos e conhecimentos disponíveis no próprio território.

Outro aspecto relevante refere-se à atuação de equipes técnicas capacitadas e à existência de uma estrutura organizacional adequada para o setor. Profissionais com formação multidisciplinar e domínio de conceitos de saúde, higiene e saneamento são fundamentais para mediar conflitos, promover consensos e articular diferentes atores institucionais e sociais. Nesse contexto, a organização administrativa e a integração com outros setores e instituições fortalecem a continuidade das políticas e garantem maior eficiência e sustentabilidade às ações de saneamento rural.

Entretanto, em municípios de pequeno porte, especialmente aqueles caracterizados por baixa densidade populacional e por particularidades topográficas,

a inexistência de sistemas centralizados de esgotamento sanitário está fortemente relacionada aos elevados custos de implantação, operação e manutenção desses sistemas. Nessas condições, a arrecadação por meio da tarifação do serviço tende a ser insuficiente para cobrir os custos associados, o que compromete a viabilidade econômica desse modelo de saneamento. Diante desse cenário, torna-se imprescindível a adoção de alternativas de esgotamento sanitário descentralizadas, sobretudo aquelas capazes de atender às demandas diretamente no próprio lote do gerador, conforme destacado pela Funasa (2018).

No âmbito das políticas públicas brasileiras, a busca por soluções adequadas para o saneamento em áreas de menor porte populacional está contemplada no Programa de Saneamento Rural, inserido no PLANSAB - Plano Nacional de Saneamento Básico instituído pela Lei nº 11.445/2007. Esse programa é executado sob a coordenação do Ministério da Saúde, por intermédio da Fundação Nacional de Saúde (Funasa). O PLANSAB também abrange o Programa de Saneamento Básico Integrado e o Programa de Saneamento Estruturante, ambos sob responsabilidade do então Ministério das Cidades, compondo um conjunto articulado de políticas públicas voltadas à ampliação, qualificação e universalização dos serviços de saneamento no país (Funasa, 2018).

No âmbito dessas diretrizes, o Programa de Saneamento Rural tem como finalidade promover ações de saneamento básico direcionadas à população residente em áreas rurais e as comunidades tradicionais, tais como povos indígenas, quilombolas e de reservas extrativistas. A implementação desse programa se justifica pela expressiva defasagem histórica na oferta de serviços de saneamento nesses territórios, bem como pelas especificidades sociais, culturais e territoriais que demandam abordagens diferenciadas daquelas tradicionalmente adotadas em áreas urbanas, tanto no que se refere às soluções tecnológicas quanto aos modelos de gestão e à relação com as comunidades atendidas (Funasa, 2018).

Diante desse cenário de carências estruturais no meio rural, a Funasa instituiu o Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR), atualmente denominado Programa de Saneamento Brasil Rural (PSBR), com o objetivo de implementar políticas públicas fundamentadas nos princípios da equidade, da intersetorialidade, da sustentabilidade e da integralidade dos serviços de saneamento. O programa considera as particularidades socioambientais e

territoriais das diferentes regiões rurais, buscando soluções compatíveis com as realidades locais (Funasa, 2019).

Nesse contexto, o programa reconhece que a superação do déficit de infraestrutura física deve estar associada à implementação de ações estruturantes, como o fortalecimento da participação comunitária, a promoção da educação ambiental voltada ao saneamento, o aprimoramento dos mecanismos de gestão e a capacitação dos atores locais. Essas ações são fundamentais para garantir a sustentabilidade, a continuidade e a efetividade das intervenções realizadas (Funasa, 2018).

As tecnologias sociais de saneamento, incorporadas ao PNSR como instrumentos de política pública, podem ser compreendidas como metodologias e soluções técnicas de baixo custo voltadas à implantação de sistemas de saneamento ambientalmente adequados e socialmente inclusivos. Essas tecnologias apresentam elevado potencial para ampliar a autonomia e o empoderamento das comunidades rurais, ao favorecer sua participação ativa nos processos de planejamento, implementação, operação e gestão das soluções adotadas (Domingos, Ribeiro, 2015; Funasa, 2019; Batista *et al.*, 2021; Ferreira *et al.*, 2023).

Para a efetividade dessas iniciativas, é fundamental o desenvolvimento de soluções que considerem as condições regionais e as características locais, bem como a inclusão das comunidades nos processos de discussão, concepção, validação e adoção das tecnologias propostas, assegurando maior adequação técnica, social e ambiental das ações de saneamento (Tonetti *et al.*, 2018; Funasa, 2019).

Nesse sentido, a matriz tecnológica do PNSR constitui um importante instrumento de apoio à tomada de decisão, ao fornecer subsídios para a escolha estratégica das tecnologias a serem implantadas em áreas rurais. Essa matriz resulta da integração de elementos relacionados às infraestruturas existentes, às demandas locais e aos aspectos de gestão dos sistemas, compondo uma visão técnica articulada que orienta a seleção de soluções mais adequadas às diferentes realidades do meio rural (Assis; Costa; Gontijo, 2024).

### 3.1.2 Saneamento Ambiental

Além do conceito de saneamento básico, destaca-se a noção de saneamento ambiental, que apresenta uma abordagem mais geral. De acordo com Aquino (2021), o saneamento ambiental compreende um conjunto integrado de ações de natureza socioeconômica voltadas à criação de condições ambientais capazes de prevenir doenças associadas ao meio ambiente e de promover a saúde da população. Enquanto o saneamento básico concentra-se, predominantemente, na garantia de acesso aos serviços essenciais, o saneamento ambiental incorpora aspectos relacionados à preservação ambiental, como a qualidade do ar, da água e do solo, a destinação adequada dos resíduos sólidos, a avaliação dos impactos ambientais decorrentes das atividades humanas e o desenvolvimento de ações de educação ambiental.

A relação entre saneamento e saúde pública é intrínseca e amplamente documentada na literatura científica, tanto sob perspectivas teóricas quanto empíricas. Um marco histórico dessa associação é o estudo desenvolvido por John Snow, publicado originalmente em 1854, que evidenciou a correlação entre a fonte de abastecimento de água e a incidência de cólera na cidade de Londres.

Pesquisas posteriores demonstraram que, tanto em países industrializados quanto em nações em desenvolvimento, a ampliação do acesso à água potável de qualidade e a adoção de sistemas adequados de tratamento das excretas resultam em expressiva redução das doenças infecto parasitárias, conforme apontado por Heller (1998) e pela Funasa (2010).

### 3.2 Saúde Ambiental

A Organização Mundial da Saúde (OMS) conceitua o saneamento como o conjunto de ações destinadas ao controle dos fatores do meio ambiente físico que possam exercer impactos negativos sobre a saúde física, mental e social da população. Essa definição evidencia o caráter preventivo das ações de saneamento, cuja finalidade principal é a proteção da saúde humana por meio da gestão e do controle ambiental.

No contexto da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, o saneamento assume papel estratégico, especialmente no âmbito do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6), que estabelece como meta assegurar a

disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos. Esse objetivo contempla ações voltadas à universalização do acesso à água potável, à melhoria da qualidade da água, à erradicação da defecação a céu aberto e à ampliação do acesso ao saneamento adequado, sendo estruturado por metas claras e mensuráveis que orientam políticas públicas e estratégias de implementação em escala global. No entanto, ao publicar suas diretrizes sobre saneamento e saúde em 2018, a OMS alertou que a universalização do saneamento dificilmente será alcançada até 2030 sem mudanças significativas nas políticas públicas e sem o aumento substancial dos investimentos no setor. A organização destacou ainda que o acesso ao saneamento adequado é fundamental para a redução de doenças de veiculação hídrica, para a melhoria das condições de saúde e para a redução da mortalidade evitável.

Nesse sentido, Málaga e García (2010) ressaltam a necessidade de garantir o acesso universal ao saneamento básico, associado à implementação de programas de educação em saúde ambiental, como estratégias essenciais para a prevenção de doenças decorrentes da exposição da população a riscos relacionados à água contaminada. Entre essas enfermidades destacam-se doenças como diarreia, febre tifoide, hepatite A, cólera e disenteria, além de arboviroses, como malária, dengue e febre amarela, e outras patologias associadas à deficiência dos serviços de saneamento.

No Brasil, a relevância dessa problemática é evidenciada por estudos como o relatório do Instituto Trata Brasil, intitulado Saneamento e Doenças de Veiculação Hídrica – Ano Base 2019, elaborado a partir de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e do Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS). Os resultados indicam que a ausência ou inadequação do saneamento básico contribui de forma significativa para a sobrecarga do sistema público de saúde, refletindo-se no aumento das internações e dos custos associados ao tratamento de doenças evitáveis.

O saneamento básico, portanto, relaciona-se diretamente com múltiplos aspectos da vida social, sendo compreendido como um conjunto de ações voltadas à promoção da saúde coletiva e à preservação dos recursos naturais indispensáveis à manutenção da vida humana (Mendes; Barcellos, 2018). Essa perspectiva está alinhada ao conceito de promoção da saúde estabelecido na Conferência de Ottawa, em 1986, que orienta políticas e práticas de saúde em nível global,

reconhecendo o saneamento como um dos principais determinantes ambientais da saúde (Mendonça; Souza; Dutra, 2009).

Sob essa ótica, o direito à saúde extrapola o tratamento de doenças, envolvendo ações preventivas e estruturais, dentre as quais o saneamento básico se destaca como elemento fundamental para o desenvolvimento econômico, social e cultural das sociedades (Heller; Nascimento, 2005). A água, em particular, constitui um recurso essencial para esse desenvolvimento, sendo que a sua contaminação está associada à ocorrência de diversas patologias causadas por microrganismos patogênicos (Libânio; Chernicharo; Nascimento, 2005). Nesse contexto, as doenças negligenciadas, em sua maioria transmissíveis, como dengue e esquistossomose, afetam de maneira desproporcional as populações de países em desenvolvimento, agravando as desigualdades em saúde pública (Funasa, 2010).

Uma das primeiras iniciativas de sistematização das doenças relacionadas à deficiência de saneamento foi apresentada por Cairncross e Feachem (1993), que propuseram uma classificação ambiental das infecções associadas à água. Segundo os autores, essas infecções podem ser agrupadas em quatro categorias principais: transmissão fecal-oral, doenças relacionadas à higiene, doenças de origem hídrica e doenças transmitidas por vetores insetos. Adicionalmente, os autores sugerem uma quinta categoria relacionada às excretas humanas, englobando enfermidades decorrentes do contato direto ou indireto com dejetos. Destacam ainda que a disposição inadequada de resíduos sólidos favorece a proliferação de microrganismos e vetores, como moscas e roedores, ampliando os riscos à saúde.

Por fim, os mesmos autores propõem uma sexta categoria de doenças associadas às condições habitacionais, considerando fatores como a localização das moradias, que pode favorecer o contato com vetores; as condições de higiene doméstica; as características de ventilação, temperatura, umidade e adensamento populacional, que influenciam a transmissão de doenças respiratórias; e aspectos construtivos das habitações que podem propiciar a presença de animais e insetos transmissores de doenças infecciosas.

### 3.3 Tecnologia Social como Alternativa para Tratamento de Esgoto

Diversas tecnologias de saneamento atualmente disponíveis não conseguem atender de forma adequada às distintas realidades populacionais. Aspectos como a limitação de recursos financeiros, a elevada complexidade tecnológica e a pouca aderência às condições socioculturais e territoriais locais tornam inviável a implantação de muitos sistemas convencionais em áreas rurais. Essas soluções, frequentemente concebidas de maneira padronizada, acabam se distanciando da realidade das comunidades onde se pretende intervir.

Nesse contexto, a partir da crítica aos modelos tradicionais de saneamento, emergiu o movimento de adoção das Tecnologias Sociais (TS), fundamentado na articulação entre os saberes populares e o conhecimento acadêmico-científico, com ênfase nas dimensões humanas e sociais do desenvolvimento (Benchouchan, 2019). As Tecnologias Sociais passaram a ser reconhecidas como instrumentos relevantes para o fortalecimento das populações rurais, uma vez que promovem a geração e a apropriação do conhecimento, contribuindo para a transformação da realidade local e estabelecendo uma conexão direta entre os problemas identificados e as soluções disponíveis.

A Tecnologia Social configura-se, assim, como um instrumento estratégico para o enfrentamento de problemáticas sociais, sendo amplamente aplicável à ampliação do acesso à água e aos serviços de saneamento. Conforme Dagnino (2014), a Tecnologia Social resulta da atuação de um ator social sobre um processo de trabalho sob seu controle, o qual, condicionado pelo contexto socioeconômico, pelos acordos sociais estabelecidos e pelo ambiente produtivo em que se insere, possibilita a transformação do produto gerado em algo apropriável de acordo com os interesses da própria comunidade envolvida.

No Brasil, o fortalecimento do debate sobre Tecnologias Sociais resultou, em 2001, na criação do Instituto de Tecnologia Social (ITS), que define Tecnologia Social como o conjunto de técnicas e metodologias de caráter transformador, desenvolvidas e aplicadas em interação direta com a população, por ela apropriadas, e voltadas à promoção da inclusão social e à melhoria das condições de vida (ITS, 2004). Segundo Dagnino (2004), um dos princípios centrais das Tecnologias Sociais é a participação ativa da sociedade nos processos de concepção e implementação das soluções, em contraposição às Tecnologias

Convencionais, que tendem a priorizar a maximização de resultados econômicos em detrimento da inclusão social.

De acordo com o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2017), as Tecnologias Sociais são desenvolvidas a partir do conhecimento da população e com sua participação direta, o que favorece soluções acessíveis, de fácil reaplicação e passíveis de adaptação às diferentes realidades e necessidades locais. Essas características conferem elevada capacidade de adequação aos contextos sociais, econômicos e ambientais em que são implementadas. No contexto brasileiro, o SEBRAE (2017) identifica uma ampla diversidade de Tecnologias Sociais, organizadas em categorias como produtos, dispositivos ou equipamentos; processos, procedimentos, técnicas ou metodologias; serviços; inovações sociais organizacionais; e inovações sociais voltadas à gestão. Ademais, essas tecnologias desempenham papel significativo na promoção da inclusão social e na conservação ambiental, reforçando seu potencial como instrumentos estratégicos para o desenvolvimento sustentável.

No âmbito do saneamento rural, a literatura especializada aponta a existência de Tecnologias Sociais tecnicamente viáveis e socialmente adequadas para o tratamento de esgoto. Nessas abordagens, os efluentes gerados podem ser compreendidos, em determinados contextos, como uma fonte potencial de água para usos específicos, a partir da aplicação do conceito de reuso hídrico (Hespanhol; Gonçalves, 2004).

De modo geral, os sistemas de tratamento adotados diferenciam-se conforme o tipo de resíduo doméstico gerado. As denominadas águas cinza, provenientes de atividades como lavagem de roupas e uso de pias, apresentam menor risco sanitário, por conterem predominantemente matéria orgânica e detergentes. Em contrapartida, as águas negras, oriundas dos vasos sanitários, quando dispostas de forma inadequada, representam elevado risco à saúde pública, em razão da elevada concentração de microrganismos patogênicos.

Nesse contexto, diferentes Tecnologias Sociais têm sido indicadas para o tratamento específico desses efluentes no meio rural. Para as águas cinzas, destacam-se alternativas como o círculo de bananeiras, os jardins filtrantes e os sistemas de *wetlands* construídos. Já para o tratamento das águas negras, são comumente apontadas soluções como o tanque de evapotranspiração, o banheiro seco e a fossa séptica biodigestora, as quais se apresentam como opções

compatíveis com as condições técnicas, ambientais e socioeconômicas das áreas rurais.

### 3.3.1 Tipos de tecnologias sociais para tratamento de esgoto

#### 3.3.1.1 *Tanque de Evapotranspiração (TEvap)*

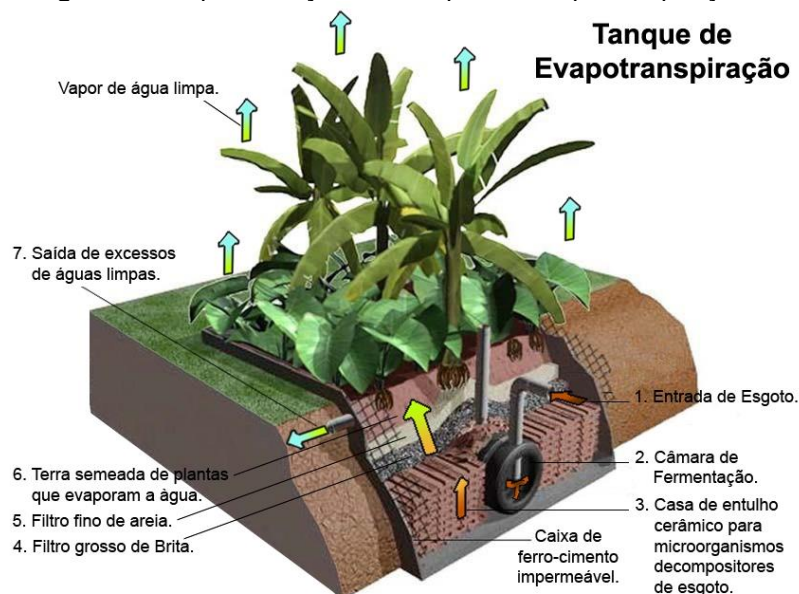
O Tanque de Evapotranspiração (TEvap) consiste em uma tecnologia desenvolvida e difundida por praticantes da permacultura de diferentes países, apresentando potencial de aplicação no tratamento domiciliar de águas negras, especialmente em áreas urbanas, periurbanas e rurais. Trata-se de um sistema constituído por um reservatório impermeabilizado, preenchido com camadas sucessivas de materiais filtrantes e substratos, no qual são cultivadas espécies vegetais de rápido crescimento e elevada demanda hídrica (Pamplona; Venturi, 2004).

De acordo com Galbiati (2009) essa tecnologia surge como uma alternativa para o tratamento de esgoto que ocorre em um único tanque, atuando como uma câmara de digestão anaeróbia em sua base e como um banhado construído de fluxo subsuperficial nas camadas superiores, o que reduz, em geral, a necessidade de tratamentos complementares (Galbiati, 2009).

Nesse tanque o efluente proveniente dos vasos sanitários é conduzido ao seu interior, onde passa por processos naturais, como a degradação microbiana da matéria orgânica, a mineralização dos nutrientes e a absorção de água e nutrientes pelas plantas, associada aos mecanismos de evaporação e transpiração vegetal. Seu dimensionamento é realizado de forma modular, sendo cada unidade projetada para atender a uma residência unifamiliar (Galbiati, 2009).

Implantado em diferentes experiências nos Estados Unidos e no Brasil, o TEvap foi originalmente proposto pelo permacultor Tom Watson e posteriormente adaptado por permaculturas brasileiros. O sistema consiste, de forma simplificada, em uma trincheira preenchida com camadas de materiais drenantes e solo, cultivada com espécies vegetais, destinada ao recebimento de esgoto doméstico, promovendo a degradação da matéria orgânica e a absorção do efluente pelas plantas. A Figura 3 mostra características de um Tanque de Evapotranspiração.

**Figura 3** – Representação de Tanque de Evapotranspiração



**Fonte:** Ecoeficientes, 2024

O Tanque apresenta demanda de área superficial relativamente elevada em comparação a sistemas convencionais de tratamento de esgoto, uma vez que integra processos de tratamento e evapotranspiração em um leito vegetado. O dimensionamento é diretamente proporcional ao número de usuários, sendo estimadas áreas de aproximadamente 5 m<sup>2</sup> para duas pessoas, 10 m<sup>2</sup> para quatro pessoas e 15 m<sup>2</sup> para seis pessoas, evidenciando crescimento linear da área ocupada em função da população atendida. Assim, trata-se de uma solução extensiva quanto ao uso do solo, ainda que com potencial de aproveitamento paisagístico (EMATER, 2024).

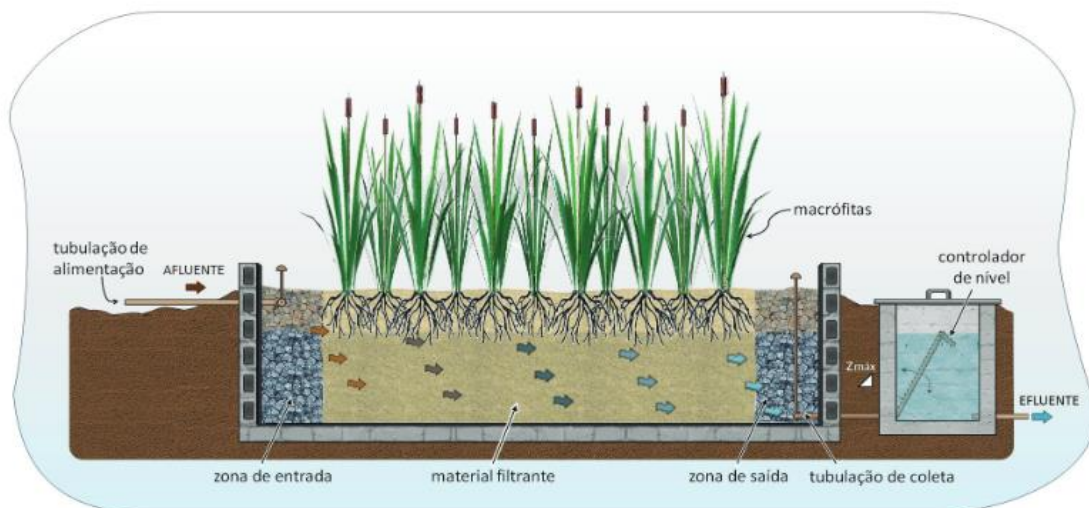
### 3.3.1.2 Wetlands

Os *wetlands* consistem em uma tecnologia ambientalmente adequada para o tratamento de águas residuárias, sendo também denominado sistema de alagados naturais. Essa técnica baseia-se na atuação conjunta das raízes de plantas macrófitas e dos microrganismos associados ao substrato e ao ambiente, responsáveis pela remoção de poluentes por meio de processos físicos, químicos e biológicos. Tal abordagem é inspirada nos mecanismos naturais de depuração observados em ecossistemas úmidos, como brejos, áreas alagadas, igarapés e manguezais (Souza *et al.*, 2024).

Os sistemas de alagados construídos, por sua vez, são estruturas implantadas em áreas escavadas no terreno natural ou sobre aterros, geralmente revestidas com geomembrana impermeabilizante e protegidas por manta geotêxtil. Esses sistemas são preenchidos com materiais porosos, formando um meio filtrante no qual são inseridas espécies vegetais. A elevada área superficial ocupada pelo substrato favorece a fixação de biofilmes microbianos e intensifica os processos de degradação e transformação dos contaminantes presentes no efluente (Souza *et al.*, 2024).

São projetados com o objetivo de reduzir o volume de efluente gerado, sendo geralmente constituídos por trincheiras preenchidas com pedras e dotadas de tubulações perfuradas para a distribuição do efluente. Esses sistemas são plantados com espécies vegetais de elevada demanda hídrica e operam predominantemente sob condições insaturadas e aeróbias. De acordo com Galbiati (2009), o efluente é inicialmente conduzido a um tanque de acumulação e, posteriormente, distribuído ao leito filtrante, onde ocorre o processo de tratamento associado ao desenvolvimento das plantas (Figura 4)

**Figura 4** – Representação de perfil de um *Wetland*



**Fonte:** Sezerino *et al.*, 2018

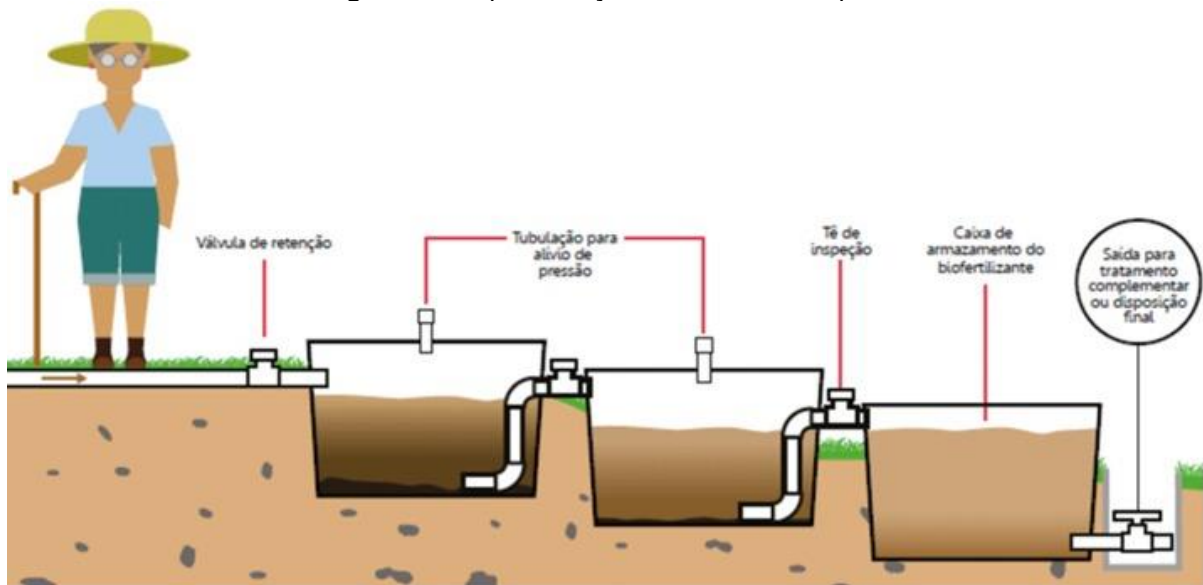
Os *wetlands* construídos configuram-se como uma alternativa eficiente e sustentável para o tratamento de esgoto sanitário, especialmente em sistemas descentralizados, apresentando bom desempenho na remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos e, em certa medida, nutrientes e patógenos, a depender da configuração adotada (fluxo superficial ou subsuperficial) e das condições

operacionais; do ponto de vista econômico, caracterizam-se por custos relativamente baixos de implantação e operação quando comparados a sistemas convencionais mecanizados, devido à reduzida demanda energética e à simplicidade de manutenção, embora o investimento inicial possa variar conforme a necessidade de impermeabilização e dos materiais utilizados; em relação à área ocupada, tratam-se de sistemas extensivos, que requerem áreas significativamente maiores, o que pode limitar sua aplicação em zonas urbanas densas, sendo mais adequados para áreas rurais ou periurbanas; por fim, o efluente final apresenta qualidade compatível com padrões de lançamento ou reúso não potável, desde que o sistema seja corretamente dimensionado e operado, podendo, em alguns casos, demandar etapas complementares de desinfecção para atendimento a requisitos sanitários mais restritivos (Souza *et al.*, 2024).

### 3.3.1.3 Fossa Séptica Biodigestora

A fossa séptica biodigestora configura-se como uma tecnologia social de baixo custo e de fácil implantação, voltada ao tratamento do esgoto doméstico proveniente exclusivamente dos vasos sanitários, composto por urina e fezes humanas. Essa tecnologia apresenta ampla aplicabilidade em áreas rurais e localidades isoladas, oferecendo uma alternativa eficiente ao lançamento de esgoto a céu aberto e ao uso de fossas rudimentares. O sistema foi desenvolvido no início dos anos 2000 pelo médico-veterinário e pesquisador Antônio Pereira de Novaes, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), com o objetivo de promover melhorias sanitárias e ambientais no meio rural. A Figura 5 mostra uma representação esquemática da fossa séptica biodigestora.

**Figura 5** – Representação de uma fossa séptica



**Fonte:** Tonetti *et al.* (2018)

O funcionamento da fossa séptica biodigestora baseia-se no processo de biodigestão anaeróbia, no qual os dejetos humanos são canalizados diretamente do vaso sanitário para um sistema fechado e hermeticamente vedado. Nesse processo, a matéria orgânica é estabilizada e convertida em um efluente com potencial para uso como fertilizante orgânico, desde que aplicado de forma criteriosa e em conformidade com recomendações técnicas (Girão *et al.*, 2019). Além de reduzir riscos à saúde pública, o sistema contribui para a reciclagem de nutrientes e para a mitigação da contaminação ambiental.

Segundo Marmo e Costa (2016), a primeira fossa séptica biodigestora foi implantada em 2001, no município de Jaboticabal, no estado de São Paulo. Desde então, a instituição (Embrapa) tem promovido ações de disseminação, capacitação e instalação dessa tecnologia em diferentes regiões do Brasil, consolidando-a como uma solução segura e apropriada para o tratamento descentralizado de esgoto doméstico em comunidades rurais.

A fossa biodigestora constitui uma tecnologia voltada especificamente ao tratamento de esgoto doméstico proveniente dos vasos sanitários (águas negras), sendo, portanto, mais adequada quando inserida em um sistema integrado de saneamento, no qual há a separação das águas cinzas na origem; nesse contexto, seu uso combinado com outras unidades de tratamento, como *wetlands* construídos, sumidouros ou valas de infiltração, permite complementar o processo, promovendo maior eficiência global na remoção de poluentes e na disposição final

do efluente. Enquanto a fossa biodigestora atua predominantemente na digestão anaeróbia da matéria orgânica, reduzindo a carga poluidora e estabilizando os resíduos, os sistemas subsequentes são responsáveis pelo polimento do efluente, remoção adicional de nutrientes e eventual infiltração ou reúso, configurando uma solução mais robusta e ambientalmente adequada. Dessa forma, a integração entre tecnologias descentralizadas possibilita melhor desempenho sanitário, maior flexibilidade de aplicação e adequação às condições locais, sobretudo em áreas rurais ou com infraestrutura limitada.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em uma revisão bibliométrica sobre tecnologias sociais e inovações tecnológicas aplicadas ao tratamento de efluentes no meio rural. A bibliometria é compreendida como uma técnica quantitativa e estatística utilizada para mensurar a produção e a disseminação do conhecimento científico, possibilitando analisar padrões de publicação, evolução temática e relações estruturais entre estudos (Araújo, 2006 *apud* Periolo, 2025). Nesse sentido, o estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza bibliométrica, com abordagem quantitativa, relacionada cujo objetivo foi examinar a produção científica relacionadas às tecnologias sociais para o esgotamento e tratamento sanitário rural, com ênfase em sistemas descentralizados e de baixo custo. A Figura 6 – mostra o fluxograma sobre revisão bibliométrica.

**Figura 6** – Fluxograma sobre revisão bibliométrica



Fonte: autoria própria (2026)

A primeira etapa metodológica consistiu na definição do escopo da pesquisa. O recorte temporal foi delimitado nos últimos dez anos, compreendendo o período. Tal delimitação foi estabelecida com o propósito de contemplar a literatura mais recente, considerando que as discussões acerca de tecnologias sociais no esgotamento sanitário rural têm se intensificado significativamente desde o início do período citado foram incluídos apenas artigos científicos publicados nos idiomas português e inglês, de modo a abranger tanto a produção nacional quanto a internacional, permitindo uma análise mais ampla e comparativa.

A coleta de dados foi realizada nas bases internacionais *Web of Science* (WoS) e *Scopus*, acessadas por meio do sistema CAFE, em razão de sua ampla cobertura multidisciplinar e do rigor nos critérios de indexação. A *Web of Science* foi selecionada pela sua relevância internacional e consistência na indexação de periódicos de alto impacto, enquanto a *Scopus* foi escolhida por ser uma das maiores bases de dados científicas do mundo, oferecendo ampla cobertura temática e métricas consolidadas de impacto e colaboração científica.

A estratégia de busca foi estruturada com o uso de descritores em português e inglês, combinados por meio de operadores booleanos (AND e OR), a fim de ampliar a abrangência e a precisão dos resultados. A pesquisa foi realizada nos campos de título, resumo e palavras-chave. Entre os termos utilizados, destacam-se: ("*rural sanitation*" OR "*wastewater treatment rural*") AND ("*decentralized sanitation systems*" OR "*small-scale wastewater treatment*") AND ("*low-cost sanitation*" OR "*eco-friendly sanitation*" OR "*affordable wastewater solutions*"). Essa combinação permitiu captar estudos voltados a soluções descentralizadas, de baixo custo e ambientalmente sustentáveis para o tratamento de esgotos em áreas rurais.

Foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão previamente definidos. Inicialmente, realizou-se a leitura dos títulos e resumos com o objetivo de excluir publicações que não apresentavam relação direta com o tema central da pesquisa. Posteriormente, procedeu-se à eliminação de registros duplicados, considerando que muitos artigos estavam indexados simultaneamente nas duas bases consultadas. Por fim, foi realizada a leitura completa dos estudos selecionados, assegurando que apenas aqueles com aderência efetiva aos objetivos do trabalho fossem incluídos na análise final.

Após a etapa de seleção, os arquivos exportados das bases foram organizados e importados para o software *RStudio*, utilizando o pacote *Bibliometrix*, ferramenta amplamente empregada em estudos de mapeamento científico. Inicialmente, realizou-se a conversão dos arquivos provenientes da *Scopus* e da *Web of Science* por meio da função `convert2df`, possibilitando a adequação dos dados ao ambiente do R. Em seguida, procedeu-se à união das bases com a função `mergeDbSources`, com remoção automática das duplicidades. A base consolidada resultante 1090 foi então exportada em formato CSV e convertida para o formato XLSX, permitindo sua utilização na interface gráfica *Biblioshiny*.

A análise bibliométrica foi conduzida por meio do pacote *Bibliometrix* e de sua extensão *web Biblioshiny*, que possibilita a geração de indicadores estatísticos e representações gráficas interativas. Foram analisados indicadores como a evolução temporal das publicações, os periódicos mais relevantes, os autores mais produtivos, os documentos mais citados, a distribuição geográfica da produção científica e as redes de colaboração entre autores e países. Também foram realizadas análises de ocorrência de palavras-chave, cocitação e acoplamento bibliográfico, com o intuito de identificar agrupamentos temáticos (*clusters*), relações estruturais entre estudos e tendências emergentes no campo do saneamento rural descentralizado.

A utilização combinada das bases *Scopus* e *Web of Science* ampliou a cobertura da literatura científica e reduziu possíveis vieses de indexação. A aplicação criteriosa dos filtros, a remoção de duplicidades e a leitura integral dos artigos selecionados contribuíram para assegurar rigor metodológico ao estudo. Dessa forma, a abordagem bibliométrica adotada permitiu mapear o panorama científico da área investigada, identificar lacunas de pesquisa e evidenciar os principais direcionamentos acadêmicos relacionados às tecnologias sociais e às inovações tecnológicas no esgotamento sanitário rural.

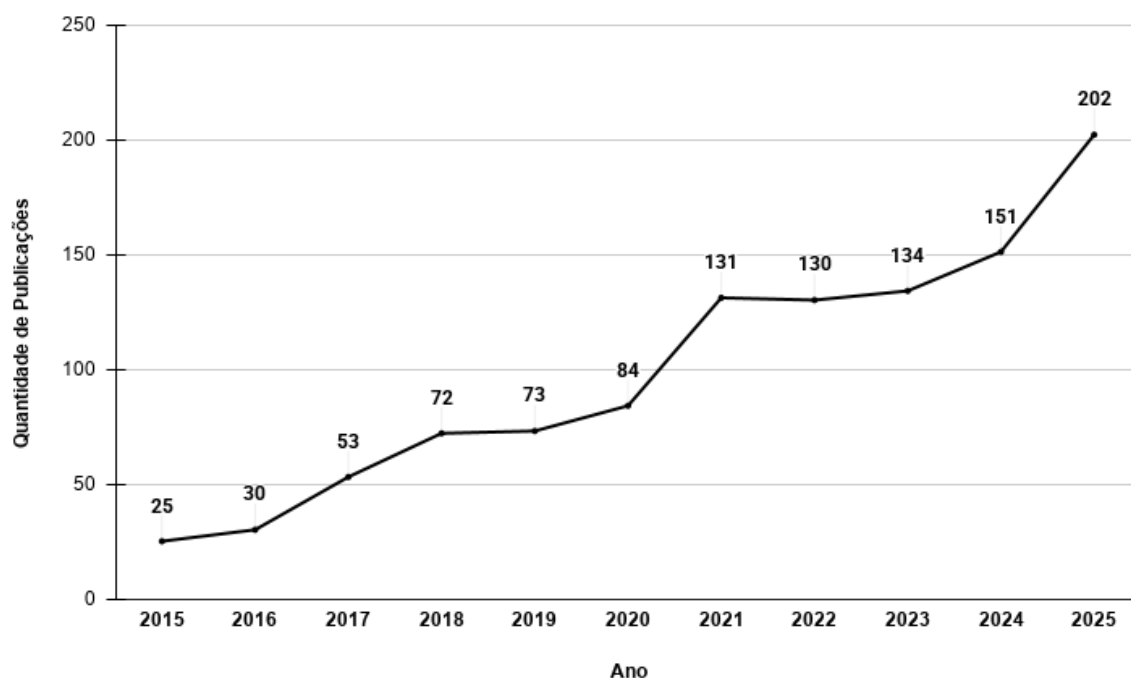
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A busca sistemática realizada nas bases de dados resultou inicialmente em 1090 publicações, distribuídas da seguinte forma: 1068 na *Web of Science* e 22 na *Scopus*. Em seguida, isto já com a remoção de artigos duplicados a serem analisados com o auxílio da plataforma *Bibliometrix*. A Figura 7 mostra o Gráfico de quantidade de publicações em razão do ano de acordo com a revisão bibliométrica. Observa-se a evolução temporal das publicações científicas entre 2015 e 2025 que evidencia uma tendência clara e consistente de crescimento da produção acadêmica sobre a temática investigada. O número de publicações passou de 25 em 2015 para 202 em 2025, representando um aumento expressivo ao longo da década analisada. No período inicial, entre 2015 e 2018, observa-se crescimento progressivo, com destaque para o salto entre 2016 (30 publicações) e 2017 (53 publicações), indicando expansão significativa do interesse científico. Entre 2018 e 2020, a produção mantém crescimento moderado, passando de 72 para 84 publicações.

A partir de 2021, verifica-se um ponto de inflexão mais acentuado na curva, com aumento substancial para 131 publicações, configurando uma fase de consolidação e expansão do campo de pesquisa. Embora haja leve oscilação em 2022 (130 publicações), a tendência de crescimento é retomada nos anos subsequentes, atingindo 151 publicações em 2024. O ano de 2025 apresenta o maior volume do período, com 202 publicações, representando o crescimento mais expressivo de toda a série histórica (+51 publicações em relação a 2024). Esse aumento reforça o caráter emergente e estratégico da temática no cenário científico contemporâneo.

De forma geral, o comportamento da curva demonstra que a área se encontra em fase de forte expansão e consolidação acadêmica. O crescimento mais intenso observado a partir de 2021 pode estar associado ao fortalecimento das discussões sobre sustentabilidade, universalização do saneamento, cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6), bem como à ampliação do debate sobre tecnologias descentralizadas e de baixo custo aplicadas ao saneamento rural.

**Figura 7** – Gráfico de quantidade de publicações em razão do ano de acordo com a revisão bibliométrica

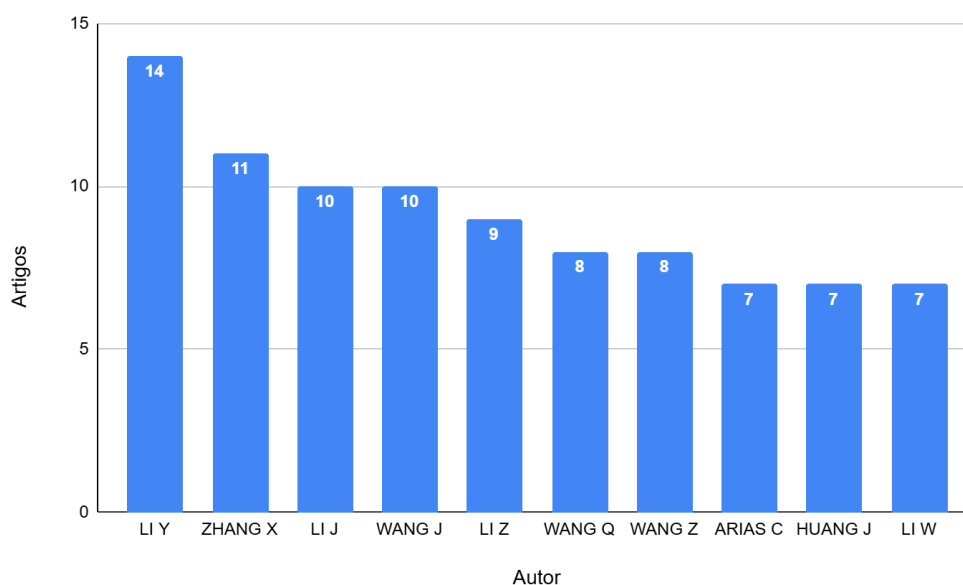


**Fonte:** autoria própria (2026)

A Figura 8 apresenta a distribuição dos autores com maior número de publicações relacionadas ao tema investigado, evidenciando a concentração da produção científica em um grupo restrito de pesquisadores. Observa-se que LI Y lidera o quantitativo de artigos ( $n=14$ ), seguido por ZHANG X ( $n=11$ ). Em sequência, LI J e WANG J aparecem com dez publicações cada, indicando participação relevante no desenvolvimento do campo. Os autores LI Z ( $n=9$ ), WANG Q e WANG Z ( $n=8$ ), além de ARIAS C, HUANG J e LI W ( $n=7$ ), também demonstram contribuição consistente.

Destaca-se que os dois autores mais produtivos são de origem chinesa, o que sugere forte protagonismo da produção científica da China na temática analisada. Esse padrão pode indicar maior investimento em pesquisa, consolidação de grupos acadêmicos especializados e redes de colaboração estabelecidas nesse contexto geográfico. De modo geral, os dados revelam uma concentração de publicações em determinados pesquisadores, característica comum em áreas em consolidação, nas quais poucos autores assumem papel central na geração e difusão do conhecimento.

**Figura 8** – Distribuição de autores com o maior número de publicações



**Fonte:** autoria própria (2026)

Já a análise do gráfico de nuvem de palavras como demonstrado na Figura 9 permitiu identificar, de forma sintética, os principais termos recorrentes nos artigos científicos selecionados, evidenciando os eixos temáticos predominantes na literatura analisada. Observa-se que palavras como “*sanitation*” (saneamento), “*removal*” (remoção), “*water*” (água), “*wastewater treatment*” (tratamento de águas residuárias) e “*performance*” (desempenho) aparecem com maior destaque visual, indicando alta frequência de ocorrência e, conseqüentemente, centralidade nas discussões acadêmicas sobre o tema. Esse padrão sugere que as pesquisas se concentram sobretudo em processos de tratamento de efluentes, eficiência na remoção de contaminantes e avaliação do desempenho de sistemas.

Além disso, a presença de termos como “*adsorption*” (adsorção), “*management*” (gestão), “*systems*” (sistemas), “*quality*” (qualidade) e “*nitrogen*” (nitrogênio) reforça a abordagem técnico-operacional dos estudos, com foco em tecnologias aplicadas ao controle de poluentes e à melhoria da qualidade da água. A recorrência de “*constructed wetlands*” (zonas úmidas construídas), “*reuse*” (reuso), “*sustainability*” (sustentabilidade) e “*sustainable development goals*” (objetivos de desenvolvimento sustentável) indica uma tendência de alinhamento das pesquisas com práticas sustentáveis e diretrizes globais de gestão de recursos hídricos.

Outros termos relevantes incluem “waste-water” (água residuária), “drinking-water” (água potável), “health” (saúde), “hygiene” (higiene), “contamination” (contaminação), “impact” (impacto), “pharmaceuticals” (fármacos/produtos farmacêuticos) e “personal care products” (produtos de cuidados pessoais), evidenciando a preocupação da literatura com os impactos ambientais e sanitários associados à presença de contaminantes emergentes em corpos hídricos.

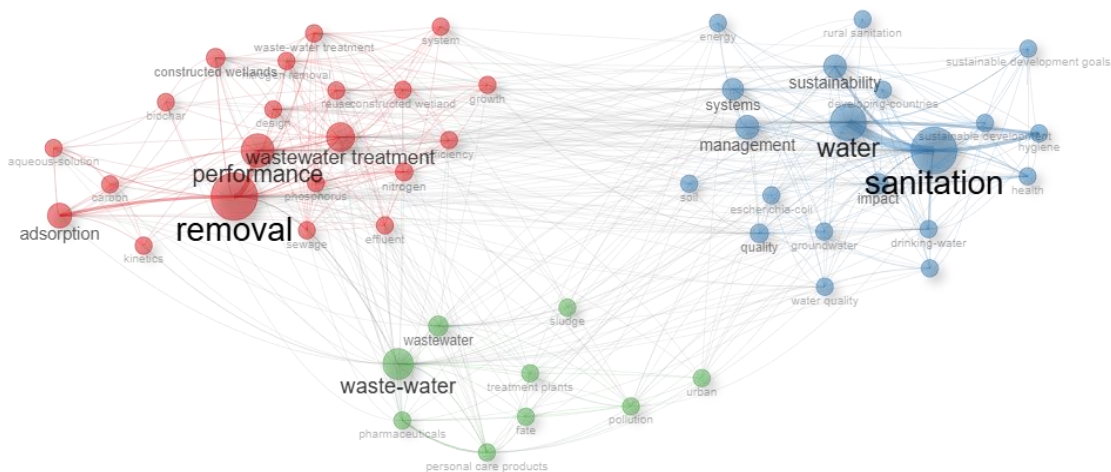
Figura 9 – Nuvem de palavras dos termos mais citados na revisão bibliométrica



Fonte: autoria própria (2026)

A rede de coocorrência de palavras apresentada na Figura 10 permite visualizar a estrutura conceitual do campo de pesquisa analisado, evidenciando as relações estabelecidas entre os principais termos presentes nos artigos científicos.

Figura 10 – Rede de ocorrência de palavras de acordo com a revisão bibliométrica



Fonte: autoria própria (2026)

Diferentemente da nuvem de palavras (Figura 9), que destaca frequência, a rede enfatiza a interconectividade temática, demonstrando como os conceitos se articulam dentro da produção científica. Observa-se a formação de três clusters principais, representados por diferentes cores (vermelho, azul e verde), indicando agrupamentos de palavras que ocorrem com maior frequência entre si.

O cluster vermelho concentra termos fortemente associados a aspectos técnicos do tratamento de águas residuárias, com destaque para conceitos ligados à eficiência de processos e à remoção de contaminantes. A densidade das conexões nesse grupo sugere uma forte integração entre estudos voltados à otimização de desempenho e tecnologias de tratamento.

O cluster azul reúne termos relacionados à gestão da água, saneamento e sustentabilidade, evidenciando a dimensão sistêmica e institucional do campo. A presença de conexões intensas nesse agrupamento indica que as discussões não se limitam aos aspectos operacionais, mas também incorporam políticas públicas, gestão integrada de recursos hídricos e metas de desenvolvimento sustentável.

Já o cluster verde apresenta um conjunto menor de termos, porém estrategicamente conectado aos demais grupos, funcionando como uma ponte temática. Esse agrupamento parece relacionar aspectos específicos — possivelmente ligados a abordagens alternativas ou complementares — com os grandes eixos de tratamento e gestão.

A elevada quantidade de ligações entre os clusters demonstra que o campo de pesquisa é altamente interdisciplinar, com forte integração entre engenharia sanitária, gestão ambiental e saúde pública. A centralidade de determinados nós (palavras com maior tamanho e número de conexões) indica os temas estruturantes do domínio científico analisado, revelando quais conceitos desempenham papel articulador nas discussões acadêmicas. Assim, a rede de co-ocorrência confirma que o campo investigado está estruturado em torno de três macroeixos: (i) eficiência e tecnologias de remoção de poluentes, (ii) gestão e sustentabilidade dos sistemas de saneamento e (iii) abordagens integradas e emergentes.

A análise da distribuição geográfica evidencia os principais polos de geração de conhecimento no campo investigado. É importante ressaltar que a métrica utilizada contabiliza a frequência de afiliações por país, refletindo o esforço total de autoria e a participação de cada nação na produção científica, o que totaliza

3.421 registros distribuídos entre os 1.085 artigos analisados. Tabela 1 mostra a quantidade de publicações em relação ao país de origem.

Tabela 1 - Os sete países com maior número de publicações científicas, considerando o país de origem

País	Quantidade de publicações no tempo escolhido
Estados Unidos	475
China	420
Reino Unido	214
Índia	173
Brasil	142
Alemanha	108
África do Sul	95
Espanha	88

**Fonte:** autoria própria (2026)

Observa-se que os Estados Unidos e a China se destacam como os principais centros, com 475 e 420 aparições de autores, respectivamente. Esse resultado reflete a robusta infraestrutura de pesquisa, os elevados investimentos em ciência e tecnologia e a concentração de centros de excelência nessas nações. Além disso, a forte demanda interna por soluções em gestão hídrica e saneamento nestes países impulsiona o volume acadêmico observado.

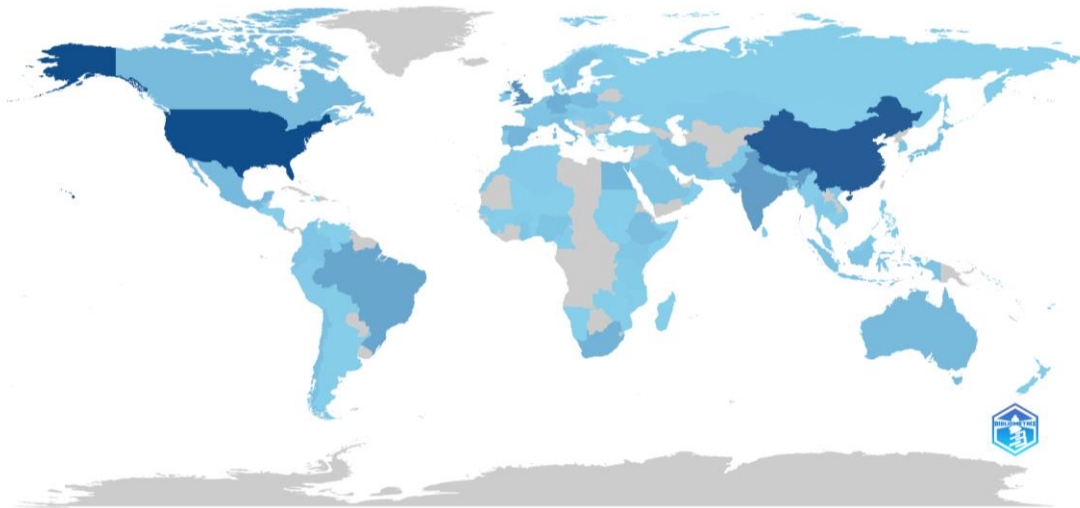
Em seguida, destacam-se o Reino Unido (214) e a Índia (173). Enquanto o Reino Unido evidencia um histórico de pesquisa consolidado e forte rede de colaboração internacional, a Índia demonstra um crescimento consistente, motivado pela urgência em enfrentar desafios de abastecimento e tratamento de efluentes em larga escala.

O Brasil, com 142 registros, posiciona-se como a principal liderança científica na América Latina. Este protagonismo nacional pode estar associado à vasta disponibilidade de recursos hídricos do país, à maturidade dos programas de pós-graduação na área ambiental e à pressão por avanços no saneamento básico e sustentabilidade. No cenário europeu, Alemanha (108) e Espanha (88) mantêm

participações expressivas, reforçando a tradição do continente em tecnologias ambientais.

A presença da África do Sul (95) é um ponto relevante, destacando a inserção do continente africano na agenda científica global, especialmente em temas de escassez hídrica. Em suma, a produção científica revela-se influenciada por fatores estruturais e necessidades socioambientais locais, mas também aponta para uma crescente internacionalização do campo, com soluções sendo debatidas e adaptadas a distintos contextos geográficos e socioeconômicos.

**Figura 10** – Publicações em relação ao país de origem representada em mapa *mundi*



**Fonte:** autoria própria (2026)

O segundo momento do trabalho consistiu na seleção dos documentos que apresentavam relação direta com a problemática investigada. Inicialmente, realizou-se a leitura dos títulos e resumos com o objetivo de verificar a aderência ao tema proposto e definir quais estudos seguiram para leitura completa. Após essa primeira triagem, procedeu-se a uma segunda análise mais detalhada, o que resultou na inclusão de 18 trabalhos considerados compatíveis com o tema tecnologias sociais no esgotamento sanitário rural.

Como critério adicional de qualificação, foram priorizados artigos com até 30 citações, sendo desconsiderados aqueles que não atendiam a esse parâmetro. Esse procedimento buscou garantir a seleção de estudos com maior reconhecimento acadêmico e relevância científica dentro do recorte temático estabelecido.

A maioria dos trabalhos excluídos abordava o saneamento de forma ampla e generalista, ou concentrava-se exclusivamente em sistemas centralizados, contextos urbanos ou tecnologias de alto custo, sem foco específico nas realidades rurais ou nas abordagens descentralizadas. Também foram descartados artigos que tratavam apenas de aspectos conceituais do saneamento, sem apresentar aplicações práticas, inovações tecnológicas ou componentes sociais vinculados ao esgotamento sanitário rural.

A escolha dos artigos para leitura aprofundada foi orientada pela pertinência direta ao objeto de estudo. Dessa forma, priorizaram-se pesquisas que abordassem

soluções descentralizadas, tecnologias de baixo custo, sistemas alternativos de tratamento de esgoto em áreas rurais e experiências de tecnologias sociais voltadas à universalização do saneamento em comunidades com infraestrutura limitada. Também foram considerados estudos que analisassem o desempenho técnico, a viabilidade econômica, a participação comunitária e a sustentabilidade ambiental dessas soluções.

Assim, a análise detalhada dos 18 artigos selecionados (Tabela 2) possibilitou a consolidação de um referencial teórico consistente e alinhado às especificidades do esgotamento sanitário rural, evidenciando perspectivas inovadoras que integram eficiência técnica, baixo custo, inclusão social e sustentabilidade ambiental.

**Tabela 2** – Título, autor e ano de lançamento das publicações presentes na revisão bibliométrica

Título	Autor	Ano de Publicação
Impactos de diferentes meios em zonas úmidas construídas para tratamento de esgoto doméstico rural	Lu <i>et al.</i>	2016
Poluição por plástico, problemas de gestão de resíduos e oportunidades de econômico circular em comunidades rurais	Mihai <i>et al.</i>	2022
Presença de antibióticos em águas residuais de um hospital rural e um urbano antes e depois do tratamento, e sua relação com o uso de antibióticos — um estudo de um ano no Vietnã	Lien <i>et al.</i>	2016
Desafios para o abastecimento sustentável de água potável: um estudo de caso sobre a qualidade e o uso da água ao longo das estações do ano em comunidades rurais da província de Limpopo, África do Sul	Edokpayi <i>et al.</i>	2018
Rumo a uma nova era do tratamento de águas residuais na China: histórico de	Xu <i>et al.</i>	2020

desenvolvimento, situação atual e perspectivas futuras		
Fatores socioeconômicos que afetam o acesso à água em áreas rurais de países de baixa e média renda	Gomez, Perdiguero e Sanz	2019
Aplicação de um novo sistema de diodo emissor de luz ultravioleta (UV-LED) de alimentação contínua para desinfetar águas residuais domésticas para descarte ou reutilização agrícola	Nguyen T <i>et al.</i>	2019
Desempenho de <i>Phragmites australis</i> e <i>Cyperus papyrus</i> no tratamento de águas residuais municipais por meio de zonas úmidas construídas de fluxo vertical subsuperficial	García-Avala F <i>et al.</i>	2019
Sustentabilidade ambiental do tratamento de águas residuais municipais por meio da precipitação de estruvita: influência dos parâmetros operacionais	Mavahungu A <i>et al.</i>	2021
Efeitos do uso de plantas ornamentais e diferentes substratos na remoção de poluentes de águas residuais por meio de microcosmos de zonas úmidas construídas	Sandoval - Herazo L <i>et al.</i>	2018
Tratamento e tecnologia de esgoto doméstico para melhoria do ambiente rural na China	Bo Y <i>et al.</i>	2022
Potencial de utilização de sistemas de zonas húmidas construídas para saneamento rural e reutilização de águas residuais na agricultura no contexto marroquino	Hdidou M <i>et al.</i>	2022

Fonte: autoria própria (2026)

**Tabela 2 (Continuação)** – Título, autor e ano de lançamento das publicações presentes na revisão bibliométrica

Título	Autor	Ano de Publicação
Redução de fósforo em filtros para tratamento de águas residuais no local	Vidal B <i>et al.</i>	2018
Mecanismos de Governança para a Ampliação de Sistemas de Tratamento e Reutilização de Águas Residuais em Pequena Escala – Lições da Índia	Reymond P <i>et al.</i>	2020
Gestão de águas cinzas: impacto ambiental, tratamento, recuperação de recursos, reciclagem de água e descentralização	Khajvand M <i>et al.</i>	2022
Tratamento descentralizado e reciclagem de águas cinzas de uma escola na zona rural da Índia	Subramanian P <i>et al.</i>	2020
Recuperação de recursos e gestão de águas residuais em áreas rurais da África do Sul: possibilidades e práticas	Montwedi M <i>et al.</i>	2021
Soluções baseadas na natureza para tratamento de águas residuais e recuperação de bioenergia: uma avaliação comparativa do ciclo de vida	Vassalle L <i>et al.</i>	2023

---

**Fonte:** autoria própria (2026)

### 5.1 Avanços Tecnológicos sobre Sistemas de Tratamento

Diante da pesquisa realizada, verifica-se que o tratamento de águas residuais em áreas rurais tem se tornado uma questão central no contexto da gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente devido ao crescente déficit de água em muitas regiões do mundo. Nesse cenário, soluções descentralizadas, como *wetlands* construídos (CWs) e o tratamento de águas cinzas (greywater), surgem como alternativas viáveis para tratar e reutilizar as águas residuais,

minimizando a pressão sobre os recursos hídricos e contribuindo para o saneamento ambiental de áreas com infraestrutura limitada.

Os *wetlands* construídos são sistemas que simulam os processos naturais dos pântanos, utilizando plantas, solo e microorganismos para tratar águas residuais. Essa tecnologia se destaca pela sua simplicidade, baixo custo operacional e eficácia na remoção de poluentes convencionais, como matéria orgânica (DBO, DQO), sólidos suspensos (SST) e nutrientes como nitrogênio e fósforo. Embora a remoção de patógenos continue sendo um desafio, a adição de tratamentos complementares, como o uso de coagulantes naturais ou a implementação de sistemas híbridos, tem mostrado ser uma alternativa eficiente para melhorar a qualidade do efluente tratado (Hdidou *et al.*, 2021).

Em diversas comunidades rurais, especialmente em regiões como o Marrocos, os CWs têm se mostrado uma tecnologia promissora para o tratamento de águas residuais e sua reutilização agrícola. Ao permitir a recuperação de nutrientes essenciais para o cultivo, os CWs ajudam a reduzir a dependência de fertilizantes químicos, ao mesmo tempo em que contribuem para a preservação dos recursos hídricos. Além disso, os CWs também desempenham um papel importante na recuperação de micropoluentes, como produtos farmacêuticos e compostos emergentes, o que demonstra a capacidade da tecnologia de se adaptar a diferentes necessidades e contextos (Hdidou *et al.*, 2021; Garfí *et al.*, 2023).

Por outro lado, o tratamento de águas cinzas (ou *greywater*), que provêm de atividades domésticas como banhos, lavagem de roupas e cozinhas, tem ganhado destaque devido à sua menor carga de contaminantes em comparação com as águas negras (provenientes de sanitários). Isso torna as águas cinzas ideais para tecnologias de tratamento descentralizado, onde a água tratada pode ser reutilizada para irrigação agrícola, lavagem ou até mesmo para usos não potáveis nas residências. O grande desafio, no entanto, está na variação da qualidade das águas cinzas, dependendo de sua origem (cozinha, banheiro, lavanderia) e da quantidade de produtos químicos utilizados, como detergentes, sabões e óleos. Tecnologias como filtros biológicos, membranas e eletrocoagulação são frequentemente empregadas para tratar águas cinzas de maneira eficiente e sustentável (Khajvanda *et al.*, 2022).

A adoção de tecnologias descentralizadas, como CWs e sistemas de tratamento de águas cinzas, oferece benefícios econômicos e ambientais

significativos, especialmente em regiões rurais com recursos financeiros limitados. As tecnologias baseadas em soluções naturais como os CWs não só reduzem os custos com infraestrutura e manutenção se comparadas aos sistemas convencionais de tratamento, como o sistema de lodos ativados, mas também proporcionam benefícios adicionais, como a recuperação de nutrientes e a redução da demanda por fertilizantes químicos. Esses sistemas têm se mostrado particularmente adequados para comunidades pequenas e isoladas, onde a construção de grandes sistemas de tratamento é inviável (Vassalle *et al.*, 2023).

Entretanto, mesmo com as vantagens ambientais e econômicas, a implementação de CWs e sistemas descentralizados de tratamento de águas cinzas enfrenta obstáculos importantes. O custo inicial de construção e a necessidade de manutenção contínua dos sistemas são desafios que exigem uma gestão eficiente e, muitas vezes, o apoio de políticas públicas. Para que essas tecnologias sejam viáveis a longo prazo, é essencial garantir a sustentabilidade econômica, o que envolve não apenas o investimento inicial, mas também um planejamento para garantir a viabilidade financeira da operação e da manutenção dos sistemas (Khajvanda *et al.*, 2022; Garfí *et al.*, 2023).

Os desafios para a adoção em larga escala de tecnologias como os *wetlands* construídos e o tratamento de águas cinzas estão intimamente relacionados à aceitação social e percepção pública. Embora o uso de águas tratadas para irrigação agrícola tenha sido amplamente aceito em diversas regiões do mundo, o uso de águas residuais tratadas para outros fins, como consumo não potável ou até mesmo para lavagem em áreas residenciais, pode ser um obstáculo, especialmente em comunidades rurais onde as percepções sobre a saúde e segurança das águas tratadas ainda não foram adequadamente abordadas (Hdidou *et al.*, 2021).

Além disso, a gestão dos efluentes em sistemas descentralizados, como o sistema de águas cinzas, também exige educação e treinamento das comunidades para garantir o funcionamento eficiente do sistema e evitar falhas operacionais que possam comprometer a qualidade do efluente tratado e, conseqüentemente, a saúde pública. A manutenção adequada dos sistemas, juntamente com uma educação contínua sobre a importância da reutilização de água, é crucial para o sucesso dessas tecnologias em comunidades rurais (Vassalle *et al.*, 2023).

## 5.2 Tecnologias para o Saneamento Rural no Brasil

No Brasil, aproximadamente metade da população rural ainda não dispõe de serviços adequados de saneamento, evidenciando um déficit estrutural significativo, agravado pela dispersão territorial, baixa densidade populacional e limitações de investimento público (Vassalle *et al.*, 2023). Nesse cenário, soluções baseadas na natureza emergem não apenas como alternativas técnicas, mas como estratégias estruturais capazes de conciliar eficiência ambiental, viabilidade econômica e adaptação às especificidades locais. Diferentemente dos sistemas centralizados convencionais, que demandam elevada infraestrutura e custos operacionais contínuos, tecnologias descentralizadas oferecem maior flexibilidade e potencial de integração com práticas de recuperação de recursos.

Os wetlands construídos (CWs) e os sistemas de lagoas de alta taxa com microalgas (high-rate algal ponds – HRAPs) destacam-se nesse contexto por operarem com base em processos ecológicos naturais. Enquanto os wetlands reproduzem mecanismos de filtração, sedimentação e degradação biológica observados em ecossistemas alagados, os HRAPs promovem a assimilação de nutrientes por meio da simbiose entre microalgas e bactérias. Essa diferença operacional implica distintos potenciais de recuperação de recursos: os wetlands priorizam estabilidade e simplicidade operacional, ao passo que os HRAPs ampliam a capacidade de geração de biomassa e energia.

A integração de reatores anaeróbios do tipo UASB com wetlands construídos e células de combustível microbianas evidencia um avanço significativo na abordagem descentralizada. O estudo conduzido por Colares *et al.* (2021) demonstrou redução de aproximadamente 71% na Demanda Química de Oxigênio (DQO), associada à geração de bioenergia com picos de tensão de até 225 mV. Esse resultado revela que sistemas descentralizados podem transcender a função tradicional de remoção de poluentes, incorporando dimensões energéticas ao tratamento. No entanto, a eficiência energética observada mostrou-se dependente de variáveis operacionais e ambientais, como comprimento radicular das plantas, condições climáticas e tempo de retenção hidráulica, indicando que o desempenho desses sistemas está fortemente condicionado ao contexto local.

Sob a perspectiva da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), a combinação entre UASB e HRAPs apresentou desempenho ambiental superior em comparação a

alternativas convencionais, especialmente em categorias críticas como potencial de aquecimento global, destruição da camada de ozônio, ecotoxicidade terrestre e escassez de recursos fósseis (Vassalle *et al.*, 2023). Essa superioridade decorre principalmente da recuperação energética via biogás e da assimilação de nutrientes pela biomassa microalgal, o que reduz emissões indiretas e dependência de insumos externos. Dessa forma, o sistema não apenas trata o efluente, mas contribui para mitigar impactos ambientais associados à matriz energética e ao uso de fertilizantes sintéticos.

Do ponto de vista econômico, embora o investimento inicial em sistemas HRAP seja relativamente elevado, a geração de biogás e a possibilidade de valorização da biomassa microalgal reduzem custos operacionais no médio e longo prazo. Essa característica altera a lógica tradicional de análise de custo-benefício, na qual sistemas descentralizados são frequentemente considerados menos competitivos. Ao incorporar a recuperação de energia e nutrientes, tais tecnologias passam a operar sob o paradigma da economia circular, transformando resíduos em insumos produtivos e promovendo maior autonomia energética em comunidades rurais — especialmente relevante em regiões com acesso limitado à eletricidade.

Adicionalmente, estudos comparativos conduzidos sob a ótica da ACV indicam que sistemas baseados na segregação na fonte e na recuperação de recursos apresentam desempenho ambiental superior quando comparados ao lançamento direto no solo, tratamentos rudimentares, fossas sépticas convencionais ou sistemas públicos centralizados (Souza *et al.*, 2023). Essa evidência reforça que a inovação no saneamento rural não se restringe à melhoria da eficiência de remoção, mas envolve a redefinição do modelo de gestão de fluxos residuários.

Entretanto, apesar do potencial técnico, ambiental e econômico, a ampla adoção dessas tecnologias enfrenta desafios estruturais. A aceitação social, a necessidade de capacitação técnica local, a adaptação às condições climáticas regionais e a variabilidade na qualidade dos efluentes são fatores que influenciam diretamente a viabilidade de implementação. Assim, embora as soluções baseadas na natureza se mostrem altamente promissoras, sua consolidação depende da integração entre inovação tecnológica, políticas públicas adequadas e participação comunitária.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os termos de busca foram definidos de modo a abranger os objetivos da pesquisa, que visavam compreender e analisar estudos publicados relacionando tecnologias sociais, saneamento descentralizado e o tratamento de águas residuárias, com ênfase no contexto rural. Destaca-se que os indicadores bibliométricos utilizados não representam medidas subjetivas de qualidade da pesquisa (dados qualitativos), mas sim métricas quantitativas, como número de publicações, frequência de citações e recorrência de termos, que permitem identificar tendências, relevância temática e evolução do campo científico.

A revisão sistemática revelou que parte das publicações corresponde a revisões de literatura, enquanto outras consistem em investigações técnicas criteriosas sobre a performance ambiental de sistemas descentralizados, especialmente WCs, aplicados em diferentes países. De modo geral, os estudos apontam diversas vantagens dessas tecnologias, destacando-se o baixo custo de implantação e manutenção, a simplicidade operacional e a elevada eficiência na remoção de poluentes, o que evidencia sua alta performance ambiental.

Com base na revisão sistemática e bibliométrica sobre inovações tecnológicas e tecnologias sociais aplicadas ao esgotamento sanitário rural, observou-se um avanço significativo na produção científica nos últimos dez anos, refletindo o crescente interesse da comunidade científica internacional por soluções descentralizadas, sustentáveis e de baixo custo para o tratamento de esgoto em áreas rurais, incluindo o contexto brasileiro. A literatura concentra-se, principalmente, em três eixos: (i) tecnologias sociais voltadas ao tratamento de esgoto; (ii) viabilidade econômica dessas soluções em zonas rurais; e (iii) benefícios ambientais e de saúde pública decorrentes da implementação de sistemas sustentáveis e acessíveis.

As pesquisas identificadas apresentam caráter interdisciplinar, articulando conhecimentos da engenharia ambiental, gestão de recursos hídricos, tecnologias sociais e saúde pública. A análise de coocorrência de termos e redes de coautoria demonstrou que países como Estados Unidos e China lideram a produção científica na área, enquanto o Brasil tem ampliado sua participação, especialmente na adaptação de tecnologias como fossas sépticas biodigestores, tanques de

evapotranspiração e *wetlands* construídos às especificidades do meio rural brasileiro.

Apesar dos avanços, foram identificadas lacunas relevantes, como a ausência de monitoramento sistemático e de longo prazo da eficácia das tecnologias implementadas, a limitação de dados sobre impactos duradouros na saúde pública e na sustentabilidade ambiental, e a necessidade de maior adequação das soluções às condições locais, considerando disponibilidade hídrica, características do solo e aspectos socioeconômicos das comunidades rurais.

Do ponto de vista ambiental, ficou evidente que as soluções descentralizadas exercem papel fundamental na preservação dos recursos hídricos, na redução da contaminação de corpos d'água e na mitigação de riscos sanitários associados ao lançamento inadequado de efluentes. Esses resultados reforçam a necessidade de políticas públicas mais robustas, aliadas a estratégias de educação ambiental e participação comunitária, para promover a adoção e a gestão adequada dessas tecnologias.

Assim, a pesquisa contribui para uma compreensão crítica das inovações tecnológicas e das tecnologias sociais aplicadas ao saneamento rural, ao evidenciar avanços, limitações e oportunidades de aprimoramento. Recomenda-se que estudos futuros aprofundem a avaliação da eficiência a longo prazo das alternativas sustentáveis de tratamento de esgoto, investiguem seus impactos sociais e ambientais de forma integrada e fortaleçam abordagens que conciliem inovação tecnológica, gestão ambiental e inclusão social, com vistas à promoção de sistemas de saneamento mais resilientes e sustentáveis nos ecossistemas rurais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AQUINO, M. C. Você sabe a diferença entre saneamento ambiental e saneamento básico? **Sinergia**, 2014. Disponível em: <https://sinergiaengenharia.com.br/noticias/voce-sabe-a-diferenca-entre-saneamento-ambiental-e-saneamento-basico/>. Acesso em: 01 mar. 2026.

ASSIS, K. K. V.; COSTA, J. S.; GONTIJO, H. M. Rural sanitation: strategies for sanitation on communities in the municipality of Itaúna - MG. **Res. Soc. Dev.**, v. 13, n. 1, 2024. DOI: 10.33448/rsd-v13i1.44738.

BATISTA, V. D. A *et al.* Tecnologias sociais voltadas para o saneamento básico de comunidades ribeirinhas na Amazônia. **Ver. Bras. Gest. Ambient. Sustentabilidade**, v. 8, n. 19, 2021. DOI: 10.21438/rbgas(2021)081918.

BENCHOUCAN, R. L. **Tecnologia social como alternativa para tratamento de esgoto em comunidades tradicionais da Amazônia**. 120 f. Monografia de Projeto Final (Bacharel em Engenharia Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: [https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24623/1/2019\\_RebecaLopesBenchouchan\\_tcc.pdf#page=38.16](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24623/1/2019_RebecaLopesBenchouchan_tcc.pdf#page=38.16). Acesso em: 26 fev. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Avaliação de impacto na saúde das ações de saneamento**: marco conceitual e estratégia metodológica. Organização Pan-Americana da Saúde. Brasília: Ministério da Saúde, 2004.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, ano 144, 8 jan. 2007.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, ano 157, 16 jul. 2020.

CABEDO JUNIOR, *et al.* Saneamento: interferência na saúde pública e no desenvolvimento socioeconômico. *In*: ZUFFO, A. M. (org.). **Engenharia sanitária e ambiental**: tecnologias para a sustentabilidade. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019.

CAIRNCROSS, S.; FEACHEM, R. **Environmental Health Engineering in the Tropics: An Introductory Text**. Chichester: Wiley, 1993.

CAPANEMA, L. Implementação do novo marco legal do saneamento: a importância da regulação por contrato em um cenário atual da transição regulatória. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, 2022.

CARVALHO, A. A. **Regulação econômica e contratos sob o Novo Marco Legal do Saneamento Básico: estudo de caso da concessão da região metropolitana**

**de Maceió.** 54 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Governança e Desenvolvimento) – Escola Nacional de Administração Pública, Brasília, 2021.

COLARES, G. S., Dell’Osbel, N., Barbosa, C. V., Lutterbeck, C., Oliveira, G. A., Rodrigues, L. R., Bergmann, C. P., Lopez, D. R., Rodriguez, A. L., Vymazal, J., & Machado, E. L. (2020). **Floating treatment wetlands integrated with microbial fuel cell for the treatment of urban wastewaters and bioenergy generation.** *Science of the Total Environment*, 142474. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142474>

DAGNINO, Renato. **Tecnologia Social:** contribuições conceituais e metodológicas. Campina Grande: EDUEPB; Florianópolis: Ed. Inular, 2014.

DOMINGOS, B. S. M.; RIBEIRO, R. B. Geração de renda informal e desenvolvimento econômico: tecnologias sociais como uma alternativa à precarização. **Quanta Comunicação e Cultura**, v. 1, n. 1, 2015.

ECOEICIENTES. TEVAP. **Ecoeficientes**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ecoeficientes.com.br/bet-como-tratar-o-esgoto-de-forma-ecologica/tevap/>. Acesso em: 26 fev. 2026.

EDOKPAYI, J. N. *et al.* Challenges to sustainable safe drinking water: a case study of water quality and use across seasons in rural communities in Limpopo province, South Africa. **Water**, v. 10, n. 2, 2018. DOI: 10.3390/w10020159.

FERREIRA, M. P.; GARCIA, M. S. D. Saneamento básico: meio ambiente e dignidade humana. **Dignidade Re-Vista**, v. 2, n. 3, 2017. Disponível em: <https://periodicos.puc-rio.br/dignidaderevista/article/view/393>. Acesso em: 01 mar. 2026.

FERREIRA, T. R. *et al.* The promotion of environmental education related to rural basic sanitation in agricultural family schools in the Vale do Mucuri Region. **Int. J. Geosci. Eng. Technol.**, v. 7, n. 1, 2023

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Impactos na saúde e no Sistema Único de Saúde decorrentes de agravos relacionados a um saneamento ambiental inadequado.** Relatório Final. Brasília: Funasa, 2010.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Manual Funasa de boas práticas na gestão de saneamento em áreas rurais.** Brasília: Funasa, 2017.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento.** 5 ed. Brasília: Funasa, 2019a.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Programa Nacional de Saneamento Rural.** Brasília: Funasa, 2019b.

GALBIATI, A. F. **Tratamento domiciliar de águas negras através de tanque de evapotranspiração**. 38 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Pioneiros, 2009.

GARCÍA-ÁVILA, F. *et al.* Performance of Phragmites australis and Cyperus papyrus in the treatment of municipal wastewater by vertical flow subsurface constructed wetlands. **Int. Soil Water Conserv. Res.**, v. 7, n. 3, 2019. DOI: 10.1016/j.iswcr.2019.04.001.

GARFÍ, M. *et al.* High rate algal ponds for wastewater treatment and biogas production in small rural communities: a life cycle assessment. **Science of the Total Environment**, v. 880, p. 163291, 2023.

GIRÃO, E. G. *et al.* **Tecnologias sociais de eco-habitação**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/197637/1/DOC19002.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2026.

GOMES, I.; BRITTO, V. Em 2023, um em casa três domicílios rurais era abastecido por rede geral de água. **Agência de notícias do IBGE**, 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/42292-em-2023-um-em-cada-tres-domicilios-rurais-era-abastecido-por-rede-geral-de-agua>. Acesso em: 01 mar. 2026.

GOMEZ, M.; PERDIGUERO, J.; SANZ, A. Socioeconomic factors affecting water access in rural áreas of low and middle income countries. **Water**, v. 11, n. 2, 2019. DOI: 10.3390/w11020202.

HDIDOU, M. *et al.* Potential use of constructed wetland systems for rural sanitation and wastewater reuse in agriculture in the Moroccan context. **Energies**, v. 15, n. 1, p. 156, 2021.

HELLER, L. Relação entre saúde e saneamento na perspectiva do desenvolvimento. **Ciê. Saúde Colet.**, v. 3, n. 2, 1998.

HESPAHOL, I.; GONÇALVES, O. M. (coord.). **Conservação e reúso de água: manual de orientações para o setor industrial**. São Paulo: FIESP, 2004.

IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. **IBGE**, 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/30/84366?ano=2017>. Acesso em: 01 mar. 2026.

ITS – Instituto de Tecnologia Social (org.). **Pesquisa nacional de tecnologia assistiva**. São Paulo: ITS Brasil, 2012.

KHAJVANDA, M. *et al.* Management of greywater: environmental impact, treatment, resource recovery, water recycling, and decentralization. **Water Science & Technology**, v. 86, n. 5, 2022.

LIBÂNIO, P. A. C.; CHERNICHARO, C. A. L.; NASCIMENTO, N. O. A dimensão da qualidade de água: avaliação da relação entre indicadores sociais, de disponibilidade hídrica, de saneamento e de saúde pública. **Eng. Sanit. e Ambient.**, v. 10, n. 3, 2005.

LIEN, L. T. Q. L. *et al.* Antibiotics in wastewater of a rural and an urban hospital before and after wastewater treatment, and the relationship with antibiotic use: a one year study from Vietnam. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, v. 13, n. 6. 2016. DOI: 10.3390/ijerph13060588.

LU, S. *et al.* Impacts of different media on constructed wetlands for rural household sewage treatment. **J. Clean. Prod.**, v. 127, 2016.

Leal, Jane Terezinha da Costa Pereira. Manual técnico fossa ecológica de evapotranspiração. EMATER / Jane Terezinha da Costa Pereira Leal, Hygor Aristides Victor Rossoni. - Belo Horizonte, 2024.

MACEDO, J. J. *et al.* Saneamento básico no Brasil: desigualdades e avanços nas áreas urbanas e rurais. **Revista Foco**, v. 18, n. 11, 2025. DOI: 10.54751/revistafoco.v18n11-019.

MÁLAGA, N.; GARCÍA, N. **Gestión del Saneamiento Ambiental Básico Rural: Manual para las Áreas Técnicas Municipales de Saneamiento**. Cusco: Editorial Imprenta LUCERO, 2010.

MARMO, C. R.; COSTA, C. C. **Relatório de avaliação dos impactos de tecnologias geradas pela Embrapa.São Carlos**. São Carlos: [s.n.], 2020. Disponível em:[https://bs.sede.embrapa.br/2019/relatorios/instrumentacao\\_fossa.pdf](https://bs.sede.embrapa.br/2019/relatorios/instrumentacao_fossa.pdf). Acesso: 01 mar. 2026.

MARTINETTI, T. H.; SHIMBO, I; TEIXEIRA, B. N. Análise de Alternativas mais Sustentáveis para Tratamento Local de Efluentes Sanitários Residenciais. *In*: IV Encontro Nacional e II Encontro LatinoAmericano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 4., 2007. **Anais ...**

MENDES, T. M.; BARCELLOS, C. A dimensão territorial do esgotamento sanitário: o caso do Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brasil. **Ciên. Saúde Colet.**, v. 23, 2018.

MENDONÇA, F. A.; SOUZA, A. V.; DUTRA, D. A. Saúde pública, urbanização e dengue no Brasil. **Soc. Nat.**, v. 21, 2009.

MAVHUNGU, A. *et al.* Environmental sustainability of municipal wastewater treatment through struvite precipitation: influence of operational parameters. **J. Clean. Prod.**, v. 285, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124856.

MIHAI, F. C. *et al.* Plastic pollution, waste management issues, and circular economy opportunities in rural communities. **Sustainability**, v. 14, n. 1, 2024. DOI: 10.3390/su14010020.

MONTWEDI, M. *et al.* Resource recovery from and management of wastewater in rural South Africa: possibilities and practices. **J. Water Process Eng.**, v. 40, 2021. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.101978.

NASCIMENTO, N. O.; HELLER, L. Ciência, tecnologia e inovação na interface entre as áreas de recursos hídricos e saneamento. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 10, n. 1, 2005.

NGUYEN, T. M. H. *et al.* Application of a novel, continuous-feeding ultraviolet light emitting diode (UV-LED) system to disinfect domestic wastewater for discharge or agricultural reuse. **Water Res.**, v. 153, 2019. DOI: 10.1016/j.watres.2019.01.006.

PAMPLONA, S.; VENTURI, M. Criação de peixe no arrozal: os benefícios do consórcio de peixe e azola para a cultura do arroz. **Permacult. Brasil Soluç. Ecol.**, v. 6, n. 16, 2004.

PERIOLO, A. M.. **Estudo bibliométrico sobre gestão de resíduos sólidos urbanos no período de 2014 a 2023 em base de artigos nacional**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Administração) - Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

REYMOND, P.; CHANDRAGIRI, R.; ULRICH, L. Governance arrangements for the scaling up of small-scale wastewater treatment and reuse systems: lessons from India. **Front. Environ. Sci.**, v. 8, 2020. DOI: 10.3389/fenvs.2020.00072.

SANDOVAL-HERAZO, L. C. *et al.* Effects of the use of ornamental plants and diferente substrates in the removal of wastewater pollutants through microcosms of constructed wetlands. **Sustainability**, v. 10, n. 5, 2018. DOI: 10.3390/su10051594.

SEBRAE. Tecnologias Sociais: Como os negócios podem transformar comunidades. **Sebrae Mato Grosso**, 2017. Disponível em: <https://sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/AP/Anexos/Tecnologias-Sociais-final.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2026.

SEZERINO, P. H. *et al.* **Wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário**: recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção. Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

Disponível em: <https://gesad.ufsc.br/files/2019/01/Sezerino-et-al.-2018.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2026.

SOUZA, T. O. *et al.* Zonas úmidas construídas com fluxo de maré de alta carga acopladas a células de combustível microbianas: efeitos da vegetação e do tamanho do material de enchimento. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, v. 31, 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-35622-7.

SOUZA, de Simone, H. H., de Moraes Lima, P., Medeiros, D. L., Vieira, J., Filho, F. J. C. M., Paulo, P. L., Fullana-i-Palmer, P., & Boncz, M. Á. (2023). **Environmental assessment of on-site source-separated wastewater treatment and reuse systems for resource recovery in a sustainable sanitation view**. *Science of the Total Environment*, 895, 165122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165122>

SUBRAMANIAN, G. Decentralized treatment and recycling of greywater from a school in rural India. **J. Water Process Eng.**, v. 38, 2020. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101695.

TONETTI, A. L. *et al.* **Tratamentos de esgotos domésticos em comunidades isoladas**: referencial para a escolha de soluções. Campinas: Unicamp, 2018. Disponível em: <https://www.fecfau.unicamp.br/~saneamentorural/wp-content/uploads/2018/11/Livro-Tratamento-de-Esgotos-Dom%C3%A9sticos-em-Comunidades-Isoladas-ilovepdf-compressed.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2026.

VASSALLE, L *et al.* Nature-based solutions for wastewater treatment and bioenergy recovery: a comparative life cycle assessment. **Sci. Total Environ.**, v. 880, 2023.

VIDAL; B. Hedström, A.; HERRMANN, I. Phosphorus reduction in filters for onsite wastewater treatment. **J. Water Process Eng.**, v. 22, 2018. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.02.005.

WHATELY, M.; LERER, R.; JARDIM, A. **Saneamento 2020**: passado, presente e possibilidade de futuro para o Brasil. São Paulo: Instituto Água e Saneamento, 2020. Disponível em: <https://www.aguaesaneamento.org.br/wp-content/uploads/2020/04/Saneamento-2020-Instituto-Agua-e-Saneamento-1.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2026.

XU, A. *et al.* Towards the new era of wastewater treatment of China: Development history, current status, and future directions. **Water Cycle**, v. 1, 2020. DOI: 10.1016/j.watcyc.2020.06.004.

Bo, Y.; Wen, W. Treatment and technology of domestic sewage for improvement of rural environment in China. **J. King Saud Univ. Eng. Sci.**, v. 34, 2022. DOI: 10.1016/j.jksus.2022.102181.