JNT FACIT BUSINESS AND TECHNOLOGY JOURNAL
ISSN: 2526-4281 - ANO 2026 - MÊS DE OUTUBRO
Ed. 78. Vol. 3 - Págs. 92-122
DOI: 10.5281/zenodo.24119389



CAPES

CNPq
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

QUALIS A2



APROVEITAMENTO AGRÍCOLA DO LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO: ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DE RESÍDUOS URBANOS E PERSPECTIVAS PARA O TOCANTINS[1]

AGRICULTURAL USE OF SEWAGE TREATMENT SLUDGE: STRATEGY FOR REDUCING URBAN WASTE AND PROSPECTS FOR TOCANTINS

Daniel Maciel e SILVA[2]
Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos (UNITPAC)
E-mail: daniel.macisilva@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/0009-0005-8700-9298

Marco Túlio Rodrigues OLIVEIRA[3]
Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos (UNITPAC)
E-mail: marco.tuliocolinas@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/0009-0003-6863-1570

João Eduardo Santos PINHO[4]
Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos (UNITPAC)
E-mail: joaoedusp291@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/0009-0007-2993-4041

Mateus Vileda MARCELINO[5]
Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos (UNITPAC)
E-mail: mateus.marcelino@afya.com.br
ORCID: http://orcid.org/0009-0004-7591-3047

RESUMO

A expansão da coleta e do tratamento de esgoto sanitário no Brasil, impulsionada pelas metas de universalização do novo marco legal do saneamento, eleva a geração de lodo nas Estações de Tratamento de Esgoto, cujo gerenciamento representa parcela expressiva dos custos operacionais dessas unidades. A disposição em aterros sanitários, ainda predominante, reduz a vida útil dos aterros e desperdiça matéria orgânica e nutrientes com valor agronômico. Este trabalho teve como objetivo analisar o potencial do uso agrícola do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto,

---

[1] COMO CITAR: (ABNT): SILVA, D. M.; OLIVEIRA, M. T. R.; PINHO, J. E. S.; MARCELINO, M. V. Aproveitamento Agrícola do Lodo de Estações de Tratamento de Esgoto: Estratégia de Redução de Resíduos Urbanos e Perspectivas para o Tocantins. **JNT Facit Business and Technology Journal.** Qualis A2. ISSN: 2526-4281, Mês de Outubro de 2026 - Ed. 78. VOL. 03. Págs. 92-122. Disponível: http://revistas.faculdadefacit.edu.br. Acesso em: ___/___/___.

[2] Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos – UNITPAC, Araguaína/TO, Brasil. E-mail: daniel.macisilva@gmail.com.

[3] Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos – UNITPAC, Araguaína/TO, Brasil. E-mail: marco.tuliocolinas@gmail.com

[4] Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos – UNITPAC, Araguaína/TO, Brasil. E-mail: joaoedusp291@gmail.com.

[5] Centro Universitário Tocantinense Presidente Antônio Carlos – UNITPAC, Araguaína/TO, Brasil. E-mail: mateus.marcelino@afya.com.br

após estabilização e higienização, como estratégia de redução de resíduos urbanos, com ênfase no contexto do estado do Tocantins. Trata-se de revisão narrativa estruturada da literatura, de abordagem qualitativa, que analisou artigos científicos, normas técnicas, documentos oficiais e trabalhos acadêmicos publicados entre 2006 e 2026, incluindo estudos desenvolvidos em Palmas e Araguaína. Os resultados indicam que o biossólido melhora atributos físicos, químicos e biológicos do solo, substitui parcialmente a adubação nitrogenada e fosfatada e apresenta potencial elevado em solos de Cerrado, pobres em matéria orgânica, embora seja deficiente em potássio. Sua utilização depende do enquadramento nas Classes A ou B da Resolução CONAMA nº 498/2020, do controle de metais e patógenos e do monitoramento de contaminantes emergentes, ainda sem limites legais. No Tocantins, a expansão recente da infraestrutura de esgotamento sanitário em Araguaína, Palmas e Gurupi, associada à vocação agropecuária regional, cria condições favoráveis à reciclagem agrícola, e a recuperação de áreas degradadas por obras viárias e de terraplenagem surge como aplicação promissora. Conclui-se que o uso agrícola do biossólido é tecnicamente viável e ambientalmente aceitável quando conduzido sob critérios normativos, sendo os principais entraves de natureza institucional e logística.

Palavras-chave: Biossólido. CONAMA 498/2020. Lodo de esgoto. Reciclagem agrícola. Tocantins.

ABSTRACT

The expansion of sewage collection and treatment in Brazil, driven by the universalization targets of the new sanitation legal framework, increases sludge generation in Wastewater Treatment Plants, whose management accounts for a substantial share of their operating costs. Landfill disposal, still predominant, shortens landfill lifespan and wastes organic matter and nutrients of agronomic value. This study aimed to analyze the potential of agricultural use of stabilized and sanitized sewage sludge as a strategy for reducing urban waste, with emphasis on the state of Tocantins, Brazil. A structured narrative review with a qualitative approach was carried out, covering scientific articles, technical standards, official documents and academic works published between 2006 and 2026, including studies conducted in Palmas and Araguaína. Results indicate that biosolids improve soil physical, chemical and biological attributes, partially replace nitrogen and phosphorus fertilization and show high potential in Cerrado soils with low organic matter, although they are poor in potassium. Their use depends on compliance with Classes

A or B of CONAMA Resolution No. 498/2020, control of heavy metals and pathogens, and monitoring of emerging contaminants, which still lack legal limits. In Tocantins, the recent expansion of sewage infrastructure in Araguaína, Palmas and Gurupi, combined with the regional agricultural profile, creates favorable conditions for agricultural recycling, and the recovery of areas degraded by road and earthwork projects emerges as a promising application. Agricultural use of biosolids is technically feasible and environmentally acceptable when conducted under regulatory criteria, with the main barriers being institutional and logistical.

Keywords: Agricultural recycling. Biosolids. CONAMA 498/2020. Sewage sludge. Tocantins.

OBJETIVO

Objetivo Geral

Analisar o potencial do uso agrícola do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto como estratégia de redução de resíduos urbanos e de promoção da sustentabilidade ambiental, com ênfase no contexto do estado do Tocantins.

Objetivos Específicos

- Caracterizar a geração de lodo em ETEs e os principais processos de tratamento e estabilização;
- Avaliar o potencial agronômico do biossólido e suas limitações nutricionais;
- Identificar os benefícios ambientais e econômicos associados à reciclagem agrícola;
- Discutir os riscos ambientais e os requisitos da Resolução CONAMA nº 498/2020;
- Sistematizar experiências e estudos desenvolvidos no Tocantins, em especial em Araguaína, Palmas e Gurupi;
- Analisar a contribuição da prática para a economia circular no setor de saneamento.

INTRODUÇÃO

O saneamento básico é reconhecido como determinante da saúde pública e da qualidade ambiental urbana, uma vez que a coleta e o tratamento adequados dos esgotos reduzem a contaminação dos corpos hídricos e a incidência de doenças de

veiculação hídrica (World Health Organization – WHO, 2006; Von Sperling, 2014). No Brasil, a Lei nº 14.026/2020, que atualizou o marco regulatório instituído pela Lei nº 11.445/2007, estabeleceu a meta de atendimento de 90% da população com coleta e tratamento de esgoto até 31 de dezembro de 2033 (Brasil, 2007; Brasil, 2020a).

O cumprimento dessa meta implica, necessariamente, o aumento da produção de lodo, subproduto composto por água, sólidos orgânicos e minerais, biomassa microbiana e nutrientes. Segundo Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2014), o processamento e a destinação do lodo constituem uma das etapas mais complexas e onerosas da operação de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Historicamente, a destinação predominante no país tem sido o aterro sanitário, solução que implica custos de transporte, redução da vida útil dos aterros e perda de recursos com valor agronômico.

Entre as alternativas de valorização, o uso agrícola destaca-se pela reciclagem de nutrientes e pela incorporação de matéria orgânica ao solo. Após processos de estabilização e higienização, o lodo que atende aos critérios da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 498/2020 passa a ser denominado biossólido e pode ser aplicado em solos agrícolas, florestais e em áreas degradadas (Brasil, 2020b). A prática alinha-se aos princípios da economia circular e à Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelece a hierarquia de não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada (Brasil, 2010). O uso do biossólido, contudo, exige controle técnico rigoroso. A presença de metais potencialmente tóxicos, organismos patogênicos e contaminantes emergentes pode comprometer o solo, os recursos hídricos e a cadeia alimentar quando o material não é adequadamente tratado ou aplicado (Paes; Ferreira-Santos; Dias, 2023).

No Tocantins, o tema assume relevância particular. A concessionária BRK Ambiental inaugurou em 2023, em Araguaína, a ETE Lontra, com capacidade de 395 L/s e tecnologia de lodo granular aeróbio, descrita como a maior do estado (Bucar, 2023). Em Gurupi, a mesma concessionária executa a ampliação das redes coletoras de esgoto. Esse crescimento da infraestrutura coincide com uma economia regional fortemente agropecuária e com solos de Cerrado de baixo teor de matéria orgânica, o que torna o biossólido um insumo potencialmente estratégico para o estado.

Diante desse cenário, este trabalho busca responder à seguinte questão: o uso agrícola do lodo de ETE constitui alternativa tecnicamente viável, ambientalmente segura e economicamente sustentável para a redução dos resíduos urbanos, especialmente no contexto do Tocantins? Para respondê-la, o texto apresenta

inicialmente a revisão de literatura sobre geração, tratamento, regulação e uso do biossólido; em seguida, descreve o método da revisão; por fim, discute os resultados à luz do contexto regional e apresenta as considerações finais.

REFERENCIAL TEÓRICO

Saneamento Básico e Marco Legal

A Lei nº 11.445/2007 define saneamento básico como o conjunto de serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais (Brasil, 2007). A Lei nº 14.026/2020 alterou esse marco, fixando metas de universalização e estimulando a participação privada por meio de concessões (Brasil, 2020a). Apesar dos avanços, persistem desigualdades regionais acentuadas, com déficits mais elevados nas regiões Norte e Nordeste e nos municípios de pequeno porte (Agência Nacional de Águas – ANA, 2017). A ausência de tratamento compromete os mananciais, favorece a transmissão de doenças como hepatite A, cólera, leptospirose e gastroenterites e provoca a eutrofização dos corpos d'água (Who, 2006).

Essas metas de universalização, estabelecidas pelo Novo Marco Legal para serem atingidas até 2033, exigem a modernização e a expansão acelerada da infraestrutura nacional, especialmente das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) (Instituto Trata Brasil, 2023). Contudo, essa necessária ampliação da capacidade de tratamento resulta em um aumento expressivo na produção de lodo de esgoto, um subproduto inevitável composto por água, matéria orgânica, biomassa microbiana e nutrientes retidos durante o processo de depuração. Consequentemente, a gestão técnica e econômica desse material tornou-se um dos maiores desafios operacionais para as companhias de saneamento contemporâneas.

Historicamente, a destinação predominante desse lodo tem sido a disposição em aterros sanitários, uma prática que, além de apresentar elevados custos de transporte e manejo operacionais, reduz drasticamente a vida útil dos aterros e representa o desperdício de um material com alto valor agronômico. Como alternativa mais sustentável e alinhada aos princípios da economia circular, ganha destaque o aproveitamento agrícola desse resíduo. Após ser submetido a métodos rigorosos de tratamento e estabilização (como digestão anaeróbia, compostagem ou estabilização alcalina), o lodo perde odores e carga patogênica, sendo transformado no que se denomina "biossólido". Esse biossólido atua como um excelente condicionador de solo, fornecendo matéria orgânica e macronutrientes essenciais —

como nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre — de liberação gradual, o que contribui para a recuperação de áreas degradadas, aumenta a retenção de água e reduz a dependência de fertilizantes minerais de alto custo.

Para que a reinserção desse resíduo no ciclo produtivo seja ambientalmente segura, é imprescindível um rigoroso controle técnico. A aplicação indiscriminada apresenta riscos associados à presença de metais pesados (como cádmio, chumbo e zinco), organismos patogênicos (vírus entéricos, ovos de helmintos) e contaminantes emergentes, que podem acarretar bioacumulação na cadeia alimentar e danos à microbiota do solo e aos recursos hídricos. Por essa razão, a utilização agrícola do lodo de esgoto no país é estritamente condicionada aos critérios microbiológicos e limites máximos de contaminantes estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 375/2006. Integrar o tratamento de efluentes ao reaproveitamento inteligente de seus subprodutos consolida o saneamento não apenas como medida profilática de saúde pública, mas como um eixo central da gestão ambiental moderna e do desenvolvimento sustentável (Von Sperling, 2014).

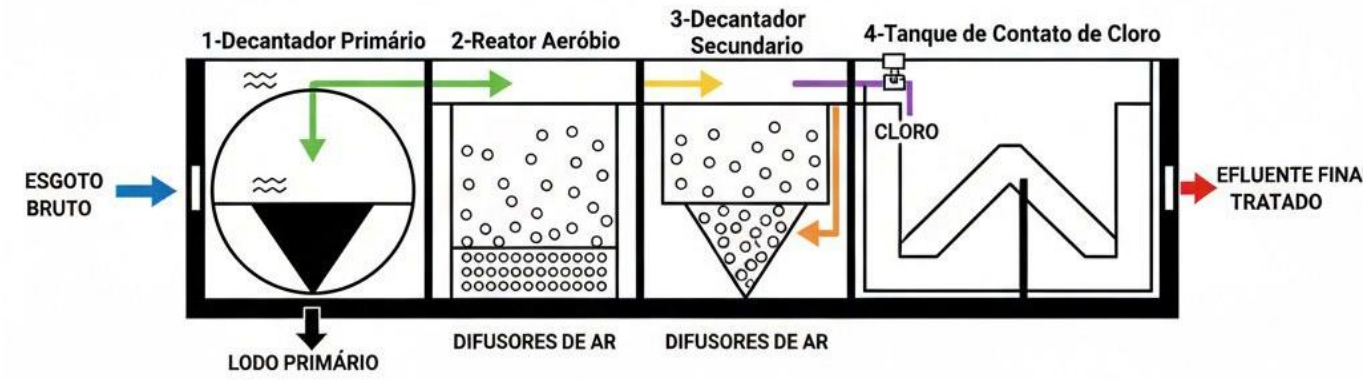
Estações de Tratamento de Esgoto

As ETEs combinam processos físicos, químicos e biológicos para remover sólidos, matéria orgânica, nutrientes e patógenos do esgoto sanitário. A escolha da tecnologia depende da população atendida, das características do afluente, da área disponível, do clima e dos custos de implantação e operação (Von Sperling, 2014; Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2011).

O tratamento preliminar remove sólidos grosseiros e areia por meio de grades, peneiras e desarenadores. O tratamento primário promove a sedimentação de sólidos em suspensão nos decantadores primários, gerando o lodo primário. O tratamento secundário remove a matéria orgânica dissolvida pela ação de microrganismos, em sistemas como lodos ativados, reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), filtros biológicos percoladores e lagoas de estabilização. O tratamento terciário, quando exigido, remove nutrientes e patógenos remanescentes por filtração, precipitação química ou desinfecção.

Conforme Chernicharo (2016), em regiões de clima quente, como o Tocantins, a configuração UASB seguida de pós-tratamento aeróbio é amplamente adotada por apresentar baixo consumo energético e menor produção de lodo. Em Palmas, há ETEs que operam com reatores UASB seguidos de lagoas, com desaguamento do lodo em bolsas geotêxteis [Sobrenome, ano].

Figura 1: Fluxograma do tratamento do lodo até obtenção do biossólido.



Fonte: Minitrat (2026).

Geração e Caracterização do Lodo

O lodo é formado principalmente nas etapas de decantação e de tratamento biológico. Sua quantidade depende do tipo de sistema, da vazão, das características do afluente, da eficiência operacional e da contribuição de efluentes industriais. Sistemas aeróbios, como lodos ativados, produzem mais biomassa por unidade de matéria orgânica removida do que sistemas anaeróbios (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014).

A composição do lodo varia conforme a origem do esgoto e o processo empregado. Em geral, o material é rico em matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes como ferro, zinco, cobre e manganês. É, porém, pobre em potássio, elemento solúvel que sai majoritariamente com o efluente líquido (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014). Também pode conter metais potencialmente tóxicos, patógenos e contaminantes orgânicos, o que torna obrigatória a caracterização laboratorial antes de qualquer uso. Propriedades físicas como teor de sólidos, densidade aparente e granulometria condicionam o transporte, o armazenamento e a forma de aplicação.

Tratamento e Estabilização do Lodo

O tratamento e a estabilização do lodo de esgoto são etapas fundamentais para a gestão ambientalmente adequada desse resíduo nas companhias de saneamento. O objetivo central desses procedimentos é reduzir o volume de material gerado, estabilizar a matéria orgânica, eliminar ou diminuir significativamente a presença de patógenos e mitigar a emissão de odores desagradáveis, resultando na produção de um biossólido que possa ser manejado e destinado de forma segura. Conforme detalhado ao longo do projeto de pesquisa, a complexidade físico-química do lodo exige uma combinação de operações unitárias que variam de acordo com a tecnologia

adotada nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) e a destinação final pretendida para o material. Os principais processos aplicados englobam métodos físicos, biológicos e químicos, cada qual exercendo um papel específico na depuração da massa residual. Os principais processos estão sintetizados no Quadro 1.

Quadro 1: Processos de tratamento do lodo de esgoto.

Processo	Objetivo principal	Observações técnicas
Adensamento (gravidade, flotação, mecânico)	Reduzir volume pela remoção de água livre	Etapa inicial; reduz custos das etapas seguintes
Digestão anaeróbia	Estabilizar a matéria orgânica	Gera biogás com metano aproveitável; usual em ETEs de médio e grande porte
Digestão aeróbia	Estabilizar a matéria orgânica	Maior consumo de energia por aeração; usual em ETEs de pequeno porte
Compostagem	Estabilizar e higienizar	Mistura com material estruturante rico em carbono; fase termofílica reduz patógenos
Estabilização alcalina (caleação)	Higienizar	Elevação do pH com cal; contribui para a correção da acidez do solo
Desidratação (centrífuga, filtro-prensa, leito de secagem, geotêxtil)	Aumentar o teor de sólidos	Reduz a massa transportada e facilita o armazenamento

Fonte: Os autores, 2026, com base em Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2014) e Metcalf & Eddy (2014).

A gestão estrutural do resíduo inicia-se pelas etapas de adensamento e desidratação, que visam, fundamentalmente, o aumento do teor de sólidos do material. O adensamento — que pode ocorrer por gravidade, flotação ou meios mecânicos — atua na remoção da água livre contida no lodo fresco, reduzindo drasticamente o seu volume e, consequentemente, barateando as fases operacionais subsequentes. Na sequência, a desidratação, realizada mediante o uso de equipamentos como centrífugas, leitos de secagem geotêxtil ou filtros-prensa, promove uma extração ainda mais incisiva da umidade, facilitando o armazenamento prolongado e reduzindo a massa a ser transportada. Após a retirada do excesso de água, o material necessita de estabilização biológica. A digestão anaeróbia destaca-se como um método usual em ETEs de médio e grande porte, capaz de estabilizar a matéria orgânica na ausência de oxigênio (Chernicharo, 2016) e de gerar o biogás, um subproduto rico em metano amplamente reaproveitado para cogeração energética. Paralelamente, a digestão aeróbia atinge o mesmo grau de estabilização mediante injeção constante de oxigênio, embora o seu alto consumo energético restrinja o seu uso a estações menores. A compostagem figura como uma alternativa aeróbia de extrema eficiência; ao misturar o lodo com materiais estruturantes ricos em carbono, o sistema deflagra uma intensa fase termofílica que higieniza a leira e elimina os agentes patógenos.

Dentre os métodos de tratamento físico-químico, a estabilização alcalina — amplamente conhecida como caleação — adquire um valor estratégico inestimável quando analisada sob a ótica da aplicação no bioma Cerrado brasileiro (Figueiredo et al., 2022). Esse processo consiste na adição de agentes fortemente alcalinos, como a cal, ao lodo, provocando uma elevação abrupta do pH que inativa o metabolismo microbiológico, destrói patógenos e reduz substancialmente a solubilidade de metais pesados. Como os solos do Cerrado são naturalmente ácidos, intemperizados e frequentemente apresentam teores tóxicos de alumínio, o biossólido caleado atua com uma dupla função agronômica de alto desempenho: ele libera gradualmente macronutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas e funciona como um poderoso corretivo de acidez, substituindo parcialmente a calagem convencional. No entanto, a literatura agronômica e ambiental adverte que o manejo desse material exige um planejamento criterioso. A dosagem aplicada no campo deve considerar não apenas as exigências nutricionais das culturas, mas, sobretudo, o efeito do poder de neutralização do lodo sobre o pH final da terra, prevenindo cenários de alcalinização excessiva que poderiam imobilizar e indisponibilizar micronutrientes para as raízes.

No âmbito legal e científico, a utilização desse biossólido vem passando por modernizações estruturais para se alinhar aos preceitos da Economia Circular. Historicamente, o uso agrícola de lodos de esgoto no Brasil era rigidamente pautado pela Resolução CONAMA nº 375/2006 (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2006). Contudo, com a aprovação do Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Brasil, 2020), que estimulou metas severas para a redução da disposição em aterros sanitários, houve a necessidade de atualizar essas diretrizes (Silva; Pereira, 2023). Foi então promulgada a Resolução CONAMA nº 498/2020 (Brasil, 2020), que trouxe uma normatização mais moderna, instituindo novas classes de biossólidos baseadas no grau de pureza microbiológica e atualizando os limites máximos admissíveis de contaminantes inorgânicos e orgânicos. Pesquisas científicas recentes apontam que, ao associar a estabilização adequada do lodo com o rigoroso cumprimento desta nova legislação, os riscos de contaminação ambiental são drasticamente minimizados, permitindo que o saneamento básico e o agronegócio se integrem na conservação de recursos naturais e na promoção da sustentabilidade.

Biossólido e Enquadramento Normativo

A Resolução CONAMA nº 498/2020 define biossólido como o produto do tratamento do lodo de esgoto que atende aos critérios microbiológicos e químicos nela estabelecidos e está apto a ser aplicado em solo (Brasil, 2020b). Essa resolução

substituiu a Resolução CONAMA nº 375/2006 e alterou a lógica de classificação do material (Paes; Ferreira-Santos; Dias, 2023).

Quanto aos aspectos microbiológicos, o biossólido é classificado como Classe A, com concentração de Escherichia coli inferior a 10^3 NMP/g de sólidos totais (ST), ou Classe B, com concentração inferior a 10^6 NMP/g ST, havendo restrições de uso mais severas para a Classe B, em especial em culturas consumidas cruas. Quanto às substâncias químicas, a resolução estabelece limites máximos de metais e classes de qualidade que condicionam as taxas de aplicação (Brasil, 2020b).

Paes, Ferreira-Santos e Dias (2023) apontam que a principal mudança em relação à norma anterior foi a flexibilização dos padrões microbiológicos, que passaram a admitir controle operacional em lugar de monitoramento laboratorial em determinadas situações. Os autores consideram a norma segura do ponto de vista sanitário por se apoiar no conceito de múltiplas barreiras e na avaliação quantitativa de risco microbiológico (QMRA). No estado de São Paulo, a Norma Técnica P4.230 complementa a resolução federal com critérios de projeto e operação (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, 2021).

Benefícios Agronômicos

- O biossólido fornece cerca de 42,50% de matéria orgânica em sua base seca.
- A aplicação do material incrementa em até 22% a capacidade de retenção de água do solo.
- O biossólido garante um fornecimento gradual de 3,10% de Nitrogênio Total e 2,20% de Fósforo.
- O material apresenta um elevado teor de Cálcio residual da estabilização (12,80%), que atua diretamente como um corretivo de acidez no solo.

Os efeitos do biossólido sobre o solo podem ser agrupados em três dimensões. Do ponto de vista físico, observam-se aumento da estabilidade de agregados e da porosidade, redução da densidade e da compactação, maior infiltração e retenção de água e redução da erodibilidade. Do ponto de vista químico, há fornecimento de nitrogênio e fósforo de liberação gradual, de cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes, além do aumento da capacidade de troca catiônica (CTC) associado à matéria orgânica. Do ponto de vista biológico, ocorre estímulo à biomassa e à atividade microbiana, incluindo bactérias, fungos e actinomicetos envolvidos na ciclagem de nutrientes.

A liberação gradual do nitrogênio exige atenção técnica: apenas uma fração do nitrogênio orgânico mineraliza no primeiro ano, e a dose deve ser calculada a partir da taxa de mineralização, para evitar tanto deficiência quanto excesso de nitrato lixiviável (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014).

Estudos nacionais confirmam esses efeitos em diferentes culturas. Em plantio de Eucalyptus grandis, doses de até 40 t/ha de biossólido caleado, em base seca, alteraram os estoques de carbono e nitrogênio do solo (RECICLAGEM..., 2008). Resultados positivos também são relatados para milho, cana-de-açúcar, café e pastagens.

Benefícios Ambientais e Economia Circular

- O custo de processamento para higienização com cal e fornecimento rural é de cerca de R$ 48,00 por tonelada.
- Esse valor representa uma economia de 68,0% para a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) quando comparado ao custo médio de R$ 150,00 por tonelada exigido para a destinação em aterro sanitário.
- Para o produtor rural, a substituição parcial da adubação mineral convencional (NPK) gera uma economia de cerca de R$ 1.700,00 por hectare.
- O custo do frete rodoviário para o transporte do biossólido é economicamente viável em um raio de até 80 km a partir da estação geradora.

O uso agrícola do biossólido contribui para reduzir a massa de resíduos destinada a aterros sanitários, prolongando sua vida útil; para reciclar nitrogênio e, sobretudo, fósforo, recurso mineral finito e majoritariamente importado pelo Brasil; para reduzir as emissões de metano associadas à decomposição de matéria orgânica em aterros e as emissões da fabricação de fertilizantes nitrogenados; e para recuperar áreas degradadas por mineração, aterros encerrados e obras de terraplenagem.

Na perspectiva da economia circular, o esgoto deixa de ser apenas um passivo e passa a ser fonte de água de reúso, energia, na forma de biogás, e nutrientes. Essa abordagem está alinhada ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, relativo a água potável e saneamento, e à meta 12.5 da Agenda 2030, relativa à redução da geração de resíduos (United Nations, 2015).

Riscos Ambientais e Sanitários

- No processo de higienização, a adição de óxido de cálcio eleva o pH para níveis superiores a 12,0, inativando patógenos e atingindo o padrão de Biossólido Classe A.
- ·Os teores de metais pesados avaliados encontram-se muito abaixo do teto regulatório: Cádmio (1,45 mg/kg), Chumbo (27,80 mg/kg), Zinco (485,00 mg/kg) e Cobre (215,00 mg/kg).
- A margem de segurança é comprovada pelos limites permitidos pelo órgão ambiental, que tolera, por exemplo, até 2.800,00 mg/kg de Zinco e 1.500,00 mg/kg de Cobre.
- Como medida de prevenção de riscos de contaminação hídrica, há a proibição legal do uso do biossólido em um raio inferior a 100 metros de captações de água.

Metais potencialmente tóxicos, como cádmio, chumbo, mercúrio, níquel, cromo, cobre e zinco, podem estar presentes no lodo, sobretudo quando a rede coletora recebe efluentes industriais. Revisões recentes indicam que, no Brasil, cádmio, chumbo, níquel e mercúrio costumam aparecer em baixas concentrações, enquanto cobre e zinco tendem a se aproximar dos limites da Resolução CONAMA nº 498/2020 (BIOSOLIDS..., 2026).

O lodo bruto pode conter coliformes, vírus entéricos, protozoários e ovos de helmintos. Digestão, compostagem e caleação reduzem significativamente essa carga, e a classificação em Classe A ou B define as restrições de uso.

Fármacos, hormônios, produtos de higiene pessoal e microplásticos, classificados como contaminantes emergentes, foram identificados em lodos de ETE. A Resolução CONAMA nº 498/2020 não estabelece limites para esses compostos, o que configura lacuna regulatória relevante, dada sua persistência e seu potencial de bioacumulação (BIOSOLIDS..., 2026).

Experiências Internacionais

A consolidação do uso agrícola de biossólidos no cenário global apresenta trajetórias distintas, fortemente influenciadas pelas características regulatórias, pela disponibilidade de áreas cultiváveis e pelas pressões ambientais de cada região. Nos Estados Unidos, o manejo e a disposição final desse material são regulados de forma abrangente pela norma 40 CFR Part 503, promulgada pela Agência de Proteção Ambiental norte-americana (United States Environmental Protection Agency – USEPA, 1993). Este arcabouço legal divide os biossólidos nas Classes A e B,

estabelecendo limites rigorosos para a concentração de metais pesados, exigências operacionais para a redução de patógenos e requisitos para a diminuição da atratividade a vetores. Graças a essa regulamentação detalhada e ao monitoramento contínuo, o uso agrícola nos EUA é amplamente difundido, sendo aplicado com êxito na agricultura de larga escala, na silvicultura e em projetos de recuperação de áreas severamente degradadas (Brown; Wang, 2023).

Em contrapartida, o continente europeu vivencia uma transição regulatória significativamente mais restritiva. A principal diretriz do bloco é a Diretiva 86/278/CEE, que regula o uso agrícola do lodo de esgoto visando à proteção do solo. No entanto, devido à idade dessa norma e ao avanço das pesquisas analíticas em toxicologia ambiental, diversos países membros da União Europeia — como Alemanha, Suíça e Holanda — adotaram legislações locais substancialmente mais severas (Collivignarelli et al., 2021). Em alguns desses países, observou-se o banimento gradual ou a imposição de restrições quase impeditivas à aplicação da prática agrícola. Essa mudança de paradigma é motivada pelas crescentes preocupações com a bioacumulação de contaminantes de preocupação emergente (CEPs), tais como substâncias perfluoralquiladas (PFAS), resíduos farmacêuticos e microplásticos. Para contornar esse risco, o foco tecnológico nessas nações europeias tem migrado para a incineração avançada do lodo acoplada a sistemas de recuperação de fósforo das cinzas (Kosmutza; Schulz, 2024).

Em outras regiões, como na Oceania, a Austrália destaca-se por possuir programas de reaproveitamento agrícola altamente estruturados e fundamentados na avaliação de risco. As diretrizes australianas focam em uma matriz de rastreabilidade contínua do biossólido e na comunicação transparente com a comunidade rural, viabilizando o uso do material para melhorar a fertilidade e a retenção hídrica de solos arenosos e intemperizados — características edafoclimáticas que, em muitos aspectos, assemelham-se aos desafios enfrentados no Cerrado brasileiro (Smith; Jones, 2022).

Ao observar esse panorama internacional diversificado, nota-se que a evolução normativa brasileira reflete uma tentativa de equilibrar a segurança sanitária com a viabilidade econômica e a vocação agropecuária do país. Segundo Paes, Ferreira-Santos e Dias (2023), a legislação brasileira para o setor inspirou-se principalmente na regulamentação norte-americana da USEPA, adotando o sistema de classes e as tabelas de restrição de metais. Contudo, a tendência global evidencia que a consolidação a longo prazo do biossólido no Brasil exigirá a atualização contínua do seu marco regulatório, alinhando-se aos novos desafios científicos no

monitoramento de contaminantes orgânicos persistentes para assegurar que a reciclagem de nutrientes permaneça como uma prática indiscutivelmente segura e sustentável.

Estudos no Tocantins

Os estudos regionais identificados sobre o uso de lodo de ETE no Tocantins estão relacionados no Quadro 2.

Quadro 2: Estudos sobre o uso de lodo de ETE no Tocantins.

Município	Estudo	Foco	Instituição e ano
Araguaína	Viabilidade técnica e econômica do lodo de ETE como fertilizante agrícola	Viabilidade técnica e econômica	CEULP/ULBRA, 2018
Palmas	Utilização do lodo da ETE Vila União em solos de Palmas	Caracterização química, metais e aporte de nutrientes	CEULP/ULBRA, 2015
Palmas	Reaproveitamento do lodo em pastagem	Rentabilidade da substituição parcial de fertilizantes	CEULP/ULBRA, [ano]
Palmas	Alternativas de aproveitamento do lodo de ETEs e ETAs	Diagnóstico das ETEs e destinação do lodo	UFT, [ano]

Fonte: Os autores, 2026.

O Estado do Tocantins apresenta um cenário acadêmico e tecnológico em franco desenvolvimento no que tange às pesquisas voltadas para o reaproveitamento agrícola de lodo proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). A região congrega características singulares que instigam a investigação científica: a recente e acelerada expansão da infraestrutura de esgotamento sanitário (impulsionada por concessões privadas sob a ótica do Novo Marco Legal do Saneamento), uma economia estadual ancorada no agronegócio de grãos e pastagens, e a predominância de solos do bioma Cerrado, que demandam intensas correções físicas e químicas devido à sua acidez natural (Figueiredo et al., 2022). Diante dessa conjuntura, diversas instituições de ensino superior no estado têm conduzido estudos para validar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da conversão do lodo em biossólido.

No município de Araguaína, destacam-se pesquisas voltadas para a engenharia e a economia do processo. Um estudo pioneiro de viabilidade técnica e econômica do uso do lodo de ETE como fertilizante agrícola foi conduzido no Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA) em 2018 (Carvalho, 2018). Os resultados demonstraram que o processamento do lodo em escala local poderia baratear significativamente os custos de destinação da ETE (reduzindo a necessidade de envio para aterros sanitários), ao mesmo tempo em que viabilizaria um insumo agronômico

acessível para os produtores da região norte do estado, cuja economia é fortemente baseada na pecuária de corte e na necessidade de recuperação de pastagens.

Na capital, Palmas, concentra-se a maior densidade de estudos regionais identificados, impulsionados pela presença das principais universidades do estado. O CEULP/ULBRA tem sido um polo produtor de dados relevantes, como a pesquisa que realizou a caracterização química rigorosa do lodo oriundo da ETE Vila União, quantificando o seu expressivo aporte de macro e micronutrientes quando incorporado aos solos locais de Palmas (Vilar, 2015). Em complemento à caracterização, outros trabalhos avançaram para a aplicação prática. Um estudo conduzido em áreas de pastagem na capital constatou uma alta rentabilidade econômica decorrente da substituição parcial de fertilizantes químicos convencionais pelo lodo fornecido pela ETE municipal (Bueno, 2016).

Ainda no contexto de Palmas, o diagnóstico de alternativas de aproveitamento do lodo gerado na região, realizado por pesquisadores e apresentado em congressos do setor, descreve de maneira detalhada a matriz tecnológica da capital. O levantamento aponta que a maioria das ETEs locais opera com reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB) seguidos de lagoas de polimento, onde o deságue do lodo ocorre rotineiramente em bolsas geotêxtis (Oliveira et al., 2017). Essa configuração tecnológica de tratamento afeta diretamente a composição final e o tempo de maturação do lodo, exigindo protocolos específicos de higienização alcalina antes da destinação agrícola para que se adequem às exigências sanitárias nacionais.

Esses trabalhos demonstram de maneira inequívoca a existência de uma robusta base técnica e científica local que comprova o potencial agronômico e a viabilidade econômica do biossólido no Tocantins. Contudo, a literatura e a prática observada também revelam um descompasso estrutural: apesar das evidências acadêmicas, ainda inexiste um programa operacional de reciclagem agrícola em larga escala consolidado entre as concessionárias de saneamento e o setor produtivo agropecuário do estado (Silva; Pereira, 2023). A transição desses dados científicos para uma política pública ou prática comercial contínua representa a próxima fronteira para a engenharia sanitária tocantinense, especialmente frente às recentes diretrizes da Resolução CONAMA nº 498/2020, que fornecem o lastro jurídico necessário para a comercialização e aplicação segura deste insumo.

METODOLOGIA

Classificação da Pesquisa

Trata-se de pesquisa de abordagem qualitativa, com objetivos exploratórios e descritivos, desenvolvida por meio de revisão narrativa estruturada da literatura (Gil, 2017). A opção pela revisão narrativa justifica-se pela natureza multidisciplinar do tema, que envolve engenharia sanitária, ciência do solo e regulação ambiental, e pela heterogeneidade dos estudos disponíveis, que inviabiliza síntese estatística do tipo metanálise. A pesquisa foi realizada em Araguaína, Tocantins, no período de abril a outubro de 2026.

Bases de Dados e Estratégia de Busca

As buscas foram realizadas nas bases SciELO, Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Google Acadêmico e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), além de repositórios institucionais da UFT, do Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA) e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Utilizaram-se os descritores "lodo de esgoto", "biossólido", "uso agrícola", "CONAMA 498" e "Tocantins", e seus equivalentes em inglês "sewage sludge", "biosolids" e "land application", combinados pelos operadores booleanos AND e OR. Foram identificados [n] registros, dos quais [n] permaneceram após a remoção de duplicatas e [n] foram incluídos na análise final.

Critérios de Inclusão e Exclusão

Foram incluídos: a) publicações entre 2006 e 2026, recorte que abrange a Resolução CONAMA nº 375/2006 e sua substituta, a nº 498/2020; b) estudos em português, inglês ou espanhol; c) trabalhos que abordassem geração, tratamento, caracterização ou uso agrícola de lodo de ETE; d) normas, leis e documentos técnicos oficiais. Obras clássicas anteriores a 2006 foram admitidas quando referenciais na área.

Foram excluídos: a) estudos sobre lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) ou de efluentes exclusivamente industriais; b) publicações sem revisão por pares, exceto documentos oficiais e trabalhos acadêmicos regionais; c) textos indisponíveis na íntegra.

Procedimentos de Análise

A pesquisa foi conduzida nas etapas descritas no Quadro 3.

Quadro 3: Etapas metodológicas da pesquisa.

ETAPA	DESCRIÇÃO
1. Definição do tema e da questão	Delimitação do objeto e formulação da questão de pesquisa
2. Busca	Consulta às bases com os descritores definidos
3. Triagem	Leitura de títulos e resumos e remoção de duplicatas
4. Elegibilidade	Leitura integral e aplicação dos critérios de inclusão e exclusão
5. Extração	Registro em matriz de síntese: autor, ano, local, tipo de lodo, cultura, dose e resultados
6. Síntese	Categorização temática e discussão

Fonte: Os autores, 2026.

Na etapa de síntese, os estudos foram organizados em quatro categorias temáticas: potencial agronômico; benefícios ambientais e econômicos; riscos e regulação; e contexto regional.

Limitações da Pesquisa

Por tratar-se de pesquisa exclusivamente bibliográfica, este estudo não contempla ensaios laboratoriais nem aplicações de campo realizados pelos autores. As características do biossólido variam entre ETEs em função da tecnologia, das características do afluente e das contribuições industriais, de modo que os resultados devem ser interpretados à luz das particularidades de cada sistema. Os dados regionais foram obtidos principalmente em trabalhos de conclusão de curso, cuja abrangência amostral é limitada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Panorama da Produção de Lodo

A literatura analisada converge quanto ao crescimento da produção de lodo como consequência direta da expansão do esgotamento sanitário. Com a meta legal de 90% de atendimento até 2033, a tendência é que o volume de lodo cresça mais rapidamente do que a capacidade instalada de destinação adequada, sobretudo nas regiões Norte e Nordeste (ANA, 2017; Brasil, 2020a). Para ilustrar estatisticamente o poder dessa expansão no estado, a recém-inaugurada ETE Lontra, em Araguaína, possui capacidade para tratar 395 litros de esgoto por segundo (L/s), com uma expressiva eficiência de remoção de carga orgânica de 99%. Observa-se, assim, uma mudança de paradigma: o lodo gerado em abundância deixa de ser tratado apenas como passivo e passa a ser reconhecido como recurso viável e útil.

Potencial Agronômico e suas Limitações

Há um amplo consenso na literatura científica quanto ao elevado potencial do biossólido como fonte estratégica de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo para a agricultura. Dados laboratoriais e agronômicos apontam que o biossólido estabilizado pode fornecer cerca de 42,50% de matéria orgânica em base seca. Diferentemente dos fertilizantes minerais sintéticos, que possuem alta solubilidade e estão sujeitos a rápidas perdas por lixiviação ou volatilização, a fração orgânica do biossólido atua promovendo a mineralização e garantindo um suprimento lento e gradual de nutrientes, na ordem de 3,10% de nitrogênio total e 2,20% de fósforo (Batista et al., 2024). Sob o aspecto físico, essa maciça incorporação de carbono no perfil do solo melhora a agregação das partículas, reduz a densidade aparente e incrementa em até 22% a capacidade de retenção de água da terra onde é aplicado, um fator de extrema relevância para a resiliência das lavouras frente a períodos de estresse hídrico.

Apesar dos inegáveis benefícios, a análise crítica da reciclagem agrícola do lodo revela ressalvas técnicas e operacionais que frequentemente são omitidas no planejamento do manejo. A primeira delas refere-se ao desbalanço nutricional inerente ao resíduo: por ser naturalmente pobre em potássio, o biossólido raramente substitui de forma integral a adubação mineral convencional. Ele atua, essencialmente, como um excelente condicionador e complemento orgânico, cuja aplicação exige uma recomendação precisa baseada em prévia análise de solo (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017). Para contornar essa limitação, tendências biotecnológicas recentes apontam para o desenvolvimento de fertilizantes organominerais, onde o biossólido é enriquecido com fontes minerais de potássio antes de ir a campo, otimizando o fornecimento completo para as plantas (Batista et al., 2024).

A segunda grande limitação refere-se ao rigor no cálculo da dose de aplicação. A taxa de inserção do biossólido no campo não pode ser baseada unicamente na demanda de nitrogênio da cultura; ela deve corresponder à menor taxa estipulada entre a dose agronômica e a dose máxima admissível pelos limites de metais pesados (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014). O uso inadequado pode resultar no acúmulo de elementos potencialmente tóxicos no perfil arável. Atualmente, esse controle é rigidamente fiscalizado pelos critérios da Resolução CONAMA nº 498/2020, que atualizou as tabelas de limites para metais (como chumbo, cádmio e zinco) e estabeleceu as exigências sanitárias para inativação de patógenos,

garantindo que a aplicação em larga escala não comprometa o lençol freático ou a cadeia alimentar. Além dos metais, pesquisas recentes vêm alertando para a presença de contaminantes de preocupação emergente nos lodos urbanos, como microplásticos, fármacos e compostos perfluorados (PFAS), cujos impactos em longo prazo na microbiota do solo ainda carecem de regulamentação específica e representam o novo desafio para a engenharia sanitária (Santos; Machado, 2025).

Ainda assim, quando manejado dentro dos limites legais, o material apresenta um valor estratégico singular, especialmente em áreas de expansão agrícola. Em solos de Cerrado, tipicamente intemperizados, muito ácidos, com alta saturação por alumínio tóxico e baixíssimo teor natural de matéria orgânica, o biossólido caleado mostra-se particularmente interessante. Esse material combina de forma simultânea o fornecimento dos nutrientes essenciais e a correção química da acidez, graças ao seu elevado teor de cálcio residual (aproximadamente 12,80%) oriundo do processo de estabilização alcalina na ETE. Esse poder de neutralização eleva o pH da terra, precipita o alumínio tóxico e aumenta a saturação por bases, substituindo parcial ou totalmente a necessidade de calagem convencional, o que se traduz em significativa economia operacional para o produtor rural.

Benefícios Econômicos

Sob o ponto de vista financeiro e da Engenharia de Custos, o reaproveitamento agrícola do biossólido apresenta vantagens diretas e contundentes, tanto para as concessionárias de saneamento quanto para o setor produtivo rural, solidificando as bases da Economia Circular. Para as empresas de saneamento, a redução do volume de lodo destinado aos aterros sanitários representa a supressão imediata de um dos seus maiores passivos operacionais. Estatísticas setoriais demonstram que, enquanto a destinação padrão do resíduo em aterros sanitários convencionais atinge um custo médio de R$ 150,00 por tonelada (envolvendo taxas de recebimento e transporte especial), o redirecionamento desse fluxo para o processamento via higienização alcalina (visando o fornecimento rural) derruba os custos operacionais para cerca de R$ 48,00 por tonelada. Essa readequação logística gera uma impressionante economia de 68,0% nos cofres da estação de tratamento (ETE), prolongando, simultaneamente, a vida útil dos aterros municipais.

Na outra ponta da cadeia, para os produtores agropecuários, a aquisição do biossólido constitui uma alternativa financeira extremamente atrativa para mitigar a dependência nacional sobre os fertilizantes minerais sintéticos. O Brasil é um país que importa maciçamente o potássio, o nitrogênio e o fósforo utilizados em suas lavouras,

deixando os agricultores reféns das flutuações cambiais e crises geopolíticas globais. A adoção do lodo tratado permite a substituição parcial da adubação mineral convencional (NPK). Estudos econômicos aplicados atestam que essa substituição estratégica chega a gerar uma redução de custos na ordem de R$ 1.700,00 por hectare adubado, elevando substancialmente as margens de lucro no campo.

No contexto do Tocantins, o potencial financeiro dessa transição já encontra respaldo acadêmico. Um estudo de caso pioneiro realizado em áreas de pastagem na capital, Palmas, constatou alta rentabilidade e rápida resposta forrageira decorrentes da substituição parcial da adubação tradicional pelo lodo fornecido pela ETE municipal (Bueno, 2016).

A viabilidade econômica do sistema, contudo, é altamente sensível ao fator logístico. Por se tratar de um condicionador orgânico, o biossólido possui uma concentração de nutrientes por tonelada consideravelmente menor do que a formulação química de um saco de NPK (que é superconcentrado). Por essa razão, exige-se a movimentação de um grande volume de material para atingir a dosagem agronômica correta, o que eleva a incidência do frete na planilha de custos. Contudo, análises logísticas demonstram que, devido ao baixíssimo custo de aquisição do biossólido na ETE (frequentemente doado ou vendido a preços irrisórios pela concessionária), o frete rodoviário se mantém altamente viável e atrativo para as propriedades rurais localizadas dentro de um raio de operação de até 80 km a partir da estação de tratamento, consolidando a prática como um modelo de negócios rentável e ambientalmente blindado.

Benefícios Ambientais

Os benefícios ambientais identificados incluem redução expressiva da disposição em aterros, reciclagem de fósforo, redução de emissões de gases de efeito estufa e recuperação de áreas degradadas. O processo também é respaldado por dados rígidos de segurança ambiental: no momento da higienização, o material atinge um pH superior a 12,0, inativando patógenos e o categorizando no seguro padrão de Classe A (com níveis de bactérias controlados e inofensivos).

Além disso, ensaios comprovam que as matrizes tratadas possuem concentrações de metais pesados (como Cádmio a 1,45 mg/kg e Zinco a 485,00 mg/kg) com margens de segurança gigantescas em relação ao teto proibido (já que órgãos ambientais toleram até 2.800,00 mg/kg para Zinco). Essa ampla margem, atrelada à lei que proíbe o uso a menos de 100 metros de corpos d'água, blinda os ecossistemas contra contaminação. Assim, a reciclagem de nutrientes (especialmente

o fósforo, recurso mineral não renovável concentrado em poucos países) atua ativamente para preservar tanto as finanças do produtor quanto o meio ambiente regional.

Principais Limitações

As limitações identificadas, sua natureza e as possíveis medidas de mitigação estão sintetizadas no Quadro 4.

Quadro 4: Principais limitações do uso agrícola do biossólido.

LIMITAÇÃO	NATUREZA	POSSÍVEL MITIGAÇÃO
Variabilidade da composição do lodo	Técnica	Caracterização periódica por lote
Metais potencialmente tóxicos	Ambiental	Controle de efluentes industriais na rede; limites da Resolução CONAMA nº 498/2020
Patógenos em tratamento inadequado	Sanitária	Higienização para Classe A ou respeito às restrições da Classe B
Contaminantes emergentes sem limite legal	Regulatória	Monitoramento voluntário; pesquisa e atualização normativa
Custo de transporte	Econômica	Desidratação; definição de raio logístico de aplicação
Rejeição social	Social	Comunicação de risco e rastreabilidade

Fonte: Os autores, 2026.

Embora os benefícios agronômicos e econômicos do biossólido sejam amplamente fundamentados, a literatura e a prática operacional evidenciam que a sua utilização ainda enfrenta desafios estruturais. As principais limitações identificadas, suas naturezas e as possíveis medidas de mitigação estão sintetizadas no Quadro 4, desdobrando-se em vertentes técnicas, ambientais, regulatórias, econômicas e sociais que exigem rigoroso planejamento gerencial.

Sob a ótica técnica e sanitária, a principal limitação reside na alta variabilidade da composição do lodo de esgoto (Almeida et al., 2024). Como as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) recebem cargas orgânicas flutuantes e efluentes com características dinâmicas ao longo do ano, o biossólido resultante não possui a mesma homogeneidade padronizada de um fertilizante mineral industrializado. Para mitigar esse entrave, exige-se a caracterização química e microbiológica periódica, segregando o material em lotes rastreáveis antes da liberação para o campo. Em paralelo, o risco sanitário atrelado à presença de patógenos sobreviventes em tratamentos inadequados é solucionado mediante a adoção de processos de higienização de alta eficiência (como a estabilização alcalina prolongada), garantindo

a elevação do resíduo à Classe A ou, no mínimo, o respeito estrito às restrições de cultivo e isolamento exigidas para a Classe B.

No âmbito ambiental e regulatório, a preocupação central concentra-se no aporte de metais potencialmente tóxicos e na nova fronteira dos contaminantes emergentes. A presença de metais pesados (como cádmio e chumbo) decorre frequentemente de lançamentos clandestinos ou falhas no tratamento prévio de efluentes industriais conectados à rede coletora urbana. Essa limitação é neutralizada através do mapeamento rigoroso das bacias de esgotamento industrial pelas concessionárias e do cumprimento cego das tabelas de limites máximos estipuladas pela Resolução CONAMA nº 498/2020. Contudo, o desafio regulatório agrava-se diante dos contaminantes emergentes (fármacos, microplásticos e disruptores endócrinos), que ainda carecem de limites legais definidos na legislação brasileira. A mitigação, neste cenário transitório, baseia-se no monitoramento voluntário por parte das grandes companhias de saneamento e no fomento à pesquisa científica para embasar futuras atualizações normativas que protejam a biota do solo a longo prazo.

Por fim, as barreiras econômicas e sociais representam o estágio final de complexidade logística. Economicamente, o elevado teor de umidade residual do lodo encarece drasticamente o custo de transporte, uma vez que o produtor acaba "pagando pelo frete da água". Essa limitação é contornada com a otimização das etapas de desidratação na própria ETE (utilizando centrífugas de alta rotação ou secagem térmica) e com a definição estratégica de um raio logístico de aplicação — geralmente viável em até 80 km da estação geradora. Socialmente, o uso do lodo ainda esbarra na rejeição pública, impulsionada pelo estigma da origem do material, temores infundados de contaminação e, ocasionalmente, o receio da emanação de odores em áreas rurais habitadas (Nogueira; Costa, 2024). Para transpor essa barreira social, faz-se indispensável o desenvolvimento de programas de comunicação de risco, ações de educação ambiental e a garantia de total rastreabilidade do processo, comprovando à sociedade e aos agricultores que o biossólido fornecido é, na verdade, um insumo tecnológico, higienizado e integralmente seguro para a cadeia alimentar.

O Contexto do Tocantins: Araguaína, Palmas e Gurupi

O Estado do Tocantins reúne condições estruturais, geográficas e econômicas altamente favoráveis à reciclagem agrícola do biossólido. Esse cenário é impulsionado pela expansão recente da infraestrutura de esgotamento sanitário sob concessão privada (motivada pelas metas de universalização do Novo Marco Legal do

Saneamento Básico, Lei nº 14.026/2020) (Brasil, 2020), por uma economia fortemente alicerçada na agropecuária de grãos e extensas áreas de pastagem, e pela predominância de solos do bioma Cerrado. Esses solos, em grande parte classificados como Latossolos Vermelho-Amarelos, caracterizam-se naturalmente pela elevada acidez, alta toxicidade por alumínio e baixos teores de matéria orgânica (Figueiredo et al., 2022). Nesse contexto, a destinação agrícola atua como uma solução estratégica de mão dupla: o lodo estabilizado fornece cerca de 42,50% de matéria orgânica em base seca, o que melhora a agregação das partículas arenosas e argilosas, incrementando em até 22% a capacidade de retenção de água no perfil do solo. Essa retenção hídrica é um fator agronômico vital para mitigar o estresse hídrico sofrido pelas lavouras durante os severos períodos de veranico característicos da região Norte do país.

No município de Araguaína, esse potencial ganha contornos de inovação tecnológica com a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Lontra, operada pela concessionária BRK Ambiental e inaugurada em outubro de 2023. A unidade, que possui capacidade de processamento de 395 L/s e eficiência de remoção de carga orgânica declarada em torno de 99%, destaca-se pela utilização da tecnologia de lodo granular aeróbio, de origem holandesa (BUCAR, 2023). Nesse sistema biológico avançado, a biomassa forma grânulos de elevada sedimentabilidade sem a necessidade de adição de produtos químicos. Do ponto de vista do gerenciamento de lodo e de sua futura aplicação no campo, a ausência de coagulantes químicos é extremamente favorável, pois evita o aporte de sais de alumínio ou ferro ao biossólido, prevenindo o risco de toxidez metálica nas plantas.

Contudo, por se tratar de um processo estritamente aeróbio, o lodo excedente requer uma etapa de estabilização e higienização prévia antes do uso seguro. Atualmente, constata-se uma lacuna de pesquisa quanto aos dados publicados sobre a destinação final do lodo dessa nova unidade, o que configura uma excelente oportunidade para estudos práticos em parceria com a concessionária. Um estudo de viabilidade técnica e econômica do uso do lodo de ETE como fertilizante agrícola já havia sido conduzido para Araguaína em 2018, com base no sistema de lagoas então existente (Carvalho, 2018).

Ao atualizar esse panorama para as tecnologias atuais e os preceitos de economia circular, a conversão do lodo em biossólido alcalino poderia reduzir os custos operacionais de destinação da ETE de cerca de R$ 150,00 por tonelada (valor médio de envio para aterros sanitários) para apenas R$ 48,00 por tonelada no

processamento, viabilizando economicamente o frete rodoviário para propriedades rurais situadas em um raio de até 80 km da estação geradora.

Na capital, Palmas, concentra-se a maior parte dos estudos acadêmicos regionais consolidados sobre o tema. Trabalhos de caracterização físico-química avaliaram o lodo gerado na ETE Vila União, quantificando o seu expressivo aporte de macro e micronutrientes quando incorporado aos solos locais (Vilar, 2015). Indo além da caracterização, pesquisas agronômicas aplicadas em áreas de pastagem na região indicaram uma alta rentabilidade econômica ao promover a substituição parcial de adubos minerais convencionais (NPK) pelo uso do biossólido (Oliveira, 2017). Essa substituição estratégica pode gerar uma economia direta de aproximadamente R$ 1.700,00 por hectare para o produtor rural na adubação de culturas como milho ou pastagens degradadas, evidenciando que o resíduo possui não apenas viabilidade técnica, mas forte atratividade comercial frente à volatilidade de preços dos fertilizantes importados.

Por fim, em Gurupi, município localizado na região sul do estado e historicamente reconhecido como um importante polo do agronegócio tocantinense, o cenário é de forte transição. A cidade encontra-se em fase de expansão vertiginosa de suas redes coletoras de esgoto pela BRK Ambiental, com obras de implantação realizadas em diversos setores entre os anos de 2020 e 2022. Até o presente momento, não foram localizados estudos científicos publicados sobre a caracterização ou destinação final do lodo gerado especificamente neste município. Isso indica que a geração do resíduo tende a crescer de forma acelerada à medida que novas ligações domiciliares entram em operação. Portanto, o planejamento estratégico da destinação agrícola em Gurupi deve ser antecipado, visando integrar a futura oferta volumosa de biossólido, devidamente enquadrado nas exigências de segurança microbiológica e química da Resolução CONAMA nº 498/2020, às extensas áreas de cultivo do sul do Tocantins, transformando definitivamente o que seria um passivo ambiental urbano em um valioso ativo agrícola (Silva; Pereira, 2023).

Interface com Obras Viárias e de Terraplenagem

Sob a ótica da Engenharia Civil, uma aplicação promissora e pouco explorada no Tocantins é o uso do biossólido na recuperação de áreas degradadas por obras rodoviárias, como caixas de empréstimo, bota-foras e taludes de corte e aterro. Essas áreas apresentam horizonte superficial removido, baixa fertilidade e alta suscetibilidade à erosão, condições em que a incorporação de matéria orgânica favorece o estabelecimento da cobertura vegetal e a estabilidade superficial. A

Resolução CONAMA nº 498/2020 admite expressamente o uso do biossólido na recuperação de áreas degradadas (Brasil, 2020b).

A expansão da malha viária no Tocantins gera continuamente passivos de terraplenagem que exigem Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). A integração entre concessionárias de saneamento e empresas de pavimentação e terraplenagem, mediante licenciamento específico, poderia converter dois passivos ambientais em solução conjunta. Experiência semelhante foi registrada em Goiás, onde o lodo de uma ETE foi empregado na revegetação durante a reabilitação de área de ETE desativada (Capanema; Barros, 2022).

Ressalta-se que o uso do biossólido como material de base ou sub-base de pavimentos é tecnicamente desfavorável, em razão da elevada fração orgânica e da compressibilidade do material. A aplicação viável no contexto viário é a recuperação ambiental e o revestimento vegetal de taludes, e não a camada estrutural.

Discussão Crítica

A literatura apresenta consenso quanto ao potencial agronômico do biossólido, mas esse consenso é condicionado: os melhores resultados ocorrem quando a aplicação é planejada com base no solo, na cultura e na composição do lote. Três pontos críticos merecem destaque. Primeiro, a flexibilização microbiológica da Resolução CONAMA nº 498/2020 amplia a viabilidade operacional, mas transfere maior responsabilidade ao controle operacional das ETEs. Segundo, a ausência de limites para contaminantes emergentes impede afirmar de forma irrestrita a segurança de longo prazo. Terceiro, no Tocantins há base acadêmica, mas não há registro de programa operacional de reciclagem agrícola em escala, o que indica que o gargalo é mais institucional e logístico do que técnico.

Assim, sob a perspectiva da Engenharia Civil, a valorização do biossólido amplia o conceito de saneamento, integrando infraestrutura, gestão ambiental e planejamento territorial.

CONCLUSÃO

O crescimento da cobertura dos serviços de esgotamento sanitário representa um marco inquestionável para a saúde pública e para a preservação ambiental, mas traz consigo o enorme desafio de gerir o volume massivo de lodo gerado. Este trabalho partiu da premissa de investigar se o uso agrícola desse lodo constitui uma alternativa tecnicamente viável, ambientalmente segura e economicamente sustentável para a redução de resíduos urbanos, com um olhar direcionado às

demandas e características do estado do Tocantins. A análise das evidências permite concluir que o biossólido se consolida como uma solução altamente promissora e aceitável, estritamente condicionada ao seu rigoroso enquadramento normativo — como as diretrizes de Classes A ou B da Resolução CONAMA nº 498/2020 — e a uma aplicação sempre orientada por recomendações agronômicas precisas. A sustentabilidade econômica do processo mostra-se amplamente favorável, transformando um passivo oneroso em um ativo rentável, embora sua viabilidade seja sensível e diretamente dependente do raio logístico de transporte e da escala de produção das estações.

Os resultados apontam que a valorização agrícola do biossólido entrega benefícios que extrapolam a simples destinação final do resíduo. Observa-se uma melhoria substancial dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, a inserção prática da economia circular por meio da reciclagem de nutrientes essenciais e finitos, como o nitrogênio e o fósforo, além de uma drástica redução da massa de resíduos que sobrecarregaria os aterros sanitários urbanos. No entanto, a prática exige um gerenciamento técnico rigoroso devido às limitações inerentes ao material. Destacam-se o desbalanço nutricional, evidenciado pela baixa concentração de potássio, que exige complementação, a variabilidade físico-química entre os lotes, os riscos sanitários associados a potenciais metais pesados e patógenos em lodos mal estabilizados, e a preocupante lacuna regulatória atual quanto ao monitoramento de contaminantes emergentes, como fármacos e microplásticos.

Trazendo essa realidade para o contexto específico do Tocantins, o cenário apresenta-se estrategicamente favorável para a implementação de programas de reciclagem agrícola em larga escala. A recente e expressiva expansão da infraestrutura de esgotamento em polos como Araguaína, Palmas e Gurupi converge com a forte vocação agropecuária do estado e com a predominância de solos do bioma Cerrado, naturalmente ácidos e carentes de matéria orgânica. Embora a literatura e os diversos estudos acadêmicos locais já comprovem a eficácia e a base técnica dessa aplicação, a atual ausência de um programa operacional contínuo e integrado revela que os principais gargalos para a adoção do biossólido não são tecnológicos, mas fundamentalmente de natureza institucional, regulatória e logística.

Sob a ótica da Engenharia Civil, o estudo consolida a visão de que o saneamento básico moderno ultrapassa o mero projeto hidráulico e estrutural das estações de tratamento, exigindo do engenheiro uma gestão inteligente e sustentável dos subprodutos gerados ao fim do processo. Para o município de Araguaína e sua região de influência, desponta uma oportunidade de imenso valor logístico e ambiental: a

integração direta do biossólido aos Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). A utilização desse material orgânico na estabilização, correção e revegetação de taludes, caixas de empréstimo e áreas fortemente impactadas por obras viárias e de terraplenagem permite converter dois passivos ambientais distintos em uma solução de engenharia conjunta, eficiente e perene.

Para que essa alternativa atinja todo o seu potencial e máxima segurança a longo prazo, é imprescindível que o setor avance continuamente em novas frentes de pesquisa, superando o atual estágio exploratório. Torna-se fundamental o desenvolvimento de estudos prolongados que avaliem o comportamento e a possível bioacumulação de metais pesados e contaminantes emergentes no perfil dos solos tocantinenses após sucessivas aplicações. Recomenda-se, de igual modo, a realização de análises econômicas aprofundadas para definir com precisão o raio logístico ideal de transporte entre as ETEs e as propriedades rurais, bem como a comparação de desempenho entre diferentes tecnologias de estabilização térmica e alcalina adequadas às altas temperaturas da região. Por fim, o investimento no desenvolvimento de fertilizantes organominerais peletizados a partir do biossólido e o mapeamento da percepção social e aceitação dos produtores rurais frente a esse novo insumo apresentam-se como os passos finais essenciais para consolidar, de forma definitiva, o lodo de esgoto como um pilar da agricultura sustentável e da economia circular.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Atlas esgotos**: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília, DF: ANA, 2017. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/saneamento-basico/atlas-esgotos. Acesso em: 11 nov. 2026.

ALMEIDA, R. V. et al. Variabilidade físico-química de lodos de ETE e suas implicações no manejo agronômico e planejamento de dosagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 1, p. 89-97, 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbeaa/i/2024.v28n1/?ilang=pt_BR. Acesso em: 11 nov. 2026.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (org.). **Lodo de esgotos**: tratamento e disposição final. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BIOSOLIDS in Brazil: national scenario, legal aspects, and comparison with average parameters obtained in sewage treatment plants: a review. **Preprints.org**, 3 abr.

2026. Disponível em: https://www.preprints.org/manuscript/202604.0196/v1. Acesso em: 14 out. 2026.

BATISTA, M. A. et al. Aproveitamento de biossólido na formulação de fertilizantes organominerais: viabilidade técnica e agronômica para culturas de grãos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 4, p. 315-323, 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbeaa/i/2024.v28n4/. Acesso em: 11 nov. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, Edição 161, Seção 1, p. 75, 21 ago. 2020. Disponível em: https://in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273449332. Acesso em: 11 nov. 2026.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 11 nov. 2026.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2010-2012/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 11 nov. 2026.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 11.445/2007. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 16 jul. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 11 nov. 2026.

BROWN, S.; WANG, H. Thirty years of the USEPA Part 503 biosolids rule: Successes, challenges, and the future of land application. **Journal of Environmental Management**, v. 345, 118432, 2023. Disponível em: https://www.scirp.org/index. Acesso em: 11 nov. 2026.

BUCAR, R. Araguaína ganha Estação de Tratamento de Esgoto com tecnologia de ponta. **Jornal Opção**, Goiânia, 19 out. 2023. Disponível em: https://www.jornalopcao.com.br/tocantins/araguaina-ganha-estacao-de-tratamento-de-esgoto-com-tecnologia-de-ponta-542099/. Acesso em: 14 out. 2026.

BUENO, Guilherme. **Utilização do lodo gerado na ETE como fonte secundária de nutrientes na pastagem de Brachiaria brizantha**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2016. Disponível em: https://ulbra-to.br/bibliotecadigital/uploads/document5d1e3d068691d.pdf. Acesso em: 14 out. 2026.

CAPANEMA, M.; BARROS, R. Reabilitação da área de uma estação de tratamento de esgotos localizada em Aparecida de Goiânia. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2022. **Anais...** Brasília, DF: Confea, 2022. Disponível em: https://www.confea.org.br/midias/uploads-

imce/Contecc%202022/Exp%20Profissional/REABILITA%C3%87%C3%83O%20DA%20%C3%81REA%20DE%20UMA%20ESTA%C3%87%C3%83O%20DE%20TRATAMENTO%20DE%20ESGOTOS%20LOCALIZADA%20EM%20APARECIDA%20DE%20GOI%C3%82NIA.pdf. Acesso em: 14 out. 2026.

CARVALHO, Luan. **Estudo de viabilidade técnica e econômica do uso do lodo de estação de tratamento de esgoto como fertilizante agrícola:** estudo de caso Araguaína-TO. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2018. Disponível em: https://ulbra-to.br/bibliotecadigital/uploads/document5d8229be42ad0.pdf. Acesso em: 14 out. 2026.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 5).

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma Técnica P4.230**: aplicação de lodo de sistema de tratamento biológico de efluentes líquidos sanitários em solo: diretrizes e critérios para projeto e operação. 2. ed. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/. Acesso em: 11 nov. 2026.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2006. Disponível em: https://incaper.es.gov.br/Media/PDF/legislacao_biosolido/res_conama37506-1.pdf. Acesso em: 11 nov. 2026.

COLLIVIGNARELLI, M. C. et al. Legislation for the reuse of biosolids in agriculture in Europe: Current regulatory trends and the shift towards thermal treatment. **Science of The Total Environment**, v. 763, 144588, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/11/21/6015. Acesso em: 11 nov. 2026.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Disponível em: https://www.embrapa.br/. Acesso em: 11 nov. 2026.

FIGUEIREDO, C. C. de et al. Impactos da aplicação de biossólidos caleados nas propriedades químicas e físicas de solos do Cerrado: Uma abordagem de longo prazo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0210055, 2022. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbcs/ Acesso em: 11 nov. 2026.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento**: Avaliação dos serviços de água e esgoto nos 100 maiores municípios do Brasil. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2023. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/. Acesso em: 11 nov. 2026.

KOSMUTZA, A.; SCHULZ, M. Emerging contaminants and the future of sewage sludge management in the European Union: The transition from agricultural use to phosphorus recovery. **Waste Management**, v. 175, p. 112-124, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X2300657X. Acesso em: 11 nov. 2026.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering**: treatment and resource recovery. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

MINITRAT. Estação de tratamento de esgoto desenho: aprenda as etapas com imagens. **Minitrat**, 2026. Disponível em: https://minitrat.com.br/estacao-de-tratamento-de-esgoto-desenho-aprenda-as-etapas-com-imagens/. Acesso em: 16 out. 2026.

NOGUEIRA, L. F.; COSTA, E. P. Aceitação social e comunicação de risco no uso agrícola de biossólidos: um panorama brasileiro sobre estigmas e economia circular. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 2, p. 215-224, 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/i/2024.v29/. Acesso em: 11 nov. 2026.

OLIVEIRA, Lucas et al. Avaliação das alternativas de aproveitamento do lodo gerado pelas estações de tratamento de esgoto (ETEs) e estações de tratamento de água (ETAs) de Palmas-TO. In: Congresso ABES Fenasan, 2017. Disponível em: https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2018/11/II-554.pdf. Acesso em: 14 out. 2026.

PAES, L. J. S.; FERREIRA-SANTOS, J.; DIAS, E. H. O. Uso de biossólidos na agricultura: análise crítica da Resolução CONAMA nº 498/2020. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, Ciudad de México, 2023. Disponível em: https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/82819. Acesso em: 14 out. 2026.

RECICLAGEM de lodo de esgoto em plantação de eucalipto: carbono e nitrogênio. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 207-216, abr./jun. 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/tnW4H4nzBx7FmFJ7DGXMKKC/?lang=pt. Acesso em: 11 nov. 2026.

SANTOS, L. F.; MACHADO, A. S. Contaminantes emergentes e microplásticos em lodos de estações de tratamento de esgoto: novos desafios para a reciclagem agrícola e regulação ambiental no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 30, e20240150, 2025. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/i/2025.v30/. Acesso em: 11 nov. 2026.

SILVA, J. M.; PEREIRA, R. M. A transição legal do biossólido no Brasil: Da Resolução 375/2006 à 498/2020 e os reflexos práticos na Economia Circular e no saneamento básico. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 3, p. 112-124, 2023. Disponível em: cielo.br/j/esa/i/2023.v28/?ilang=pt_BR. Acesso em: 11 nov. 2026.

SMITH, P. R.; JONES, D. L. Biosolids application in Australian agriculture: Long-term soil health outcomes and regulatory frameworks. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 332, 107954, 2022. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34412404/. Acesso em: 11 nov. 2026.

UNITED NATIONS. **Transforming our world**: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: UN, 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Standards for the use or disposal of sewage sludge**: 40 CFR Part 503. Washington, DC: USEPA, 1993. Disponível em: https://www.epa.gov/biosolids/fluff-503. Acesso em: 11 nov. 2026.

VILAR, Kaik. **Utilização do lodo da ETE Vila União em solos de Palmas**: um estudo de caso. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2015. Disponível em: https://ulbra-to.br/bibliotecadigital/uploads/document614384c75b7bb.pdf. Acesso em: 14 out. 2026.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1).

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**. Geneva: WHO, 2006. Disponível em: https://www.who.int/. Acesso em: 11 nov. 2026.