JNT FACIT BUSINESS AND TECHNOLOGY JOURNAL
ISSN: 2526-4281 - ANO 2026 - MÊS DE OUTUBRO
Ed. 78. Vol. 1 - Págs. 466-481
DOI: 10.5281/zenodo.23220427



CAPES

CNPq
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

QUALIS A2



USO DE BIOSSÓLIDOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA PRODUÇÃO DE HORTALIÇAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA[1]

USE OF BIOSOLIDS FROM WASTEWATER TREATMENT PLANTS IN VEGETABLE PRODUCTION: A SYSTEMATIC REVIEW

Tcharlys Mota BASTOS
Afya Centro Universitário (UNITPAC)
E-mail: tcharlysmota@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/0009-0009-3013-7570

Antônio Oliveira de MACEDO JÚNIOR
Afya Centro Universitário (UNITPAC)
E-mail: antoniojroliveira@gmail.com
ORCID: http://orcid.org/0009-0002-4537-1430

José ANDRÉ JÚNIOR
Afya Centro Universitário (UNITPAC)
E-mail: jose.andre@afya.com.br
ORCID: http://orcid.org/0009-0008-1119-7685

RESUMO

O uso agrícola de lodo de esgoto e biossólidos pode contribuir para a reciclagem de nutrientes e matéria orgânica, porém exige avaliação conjunta do desempenho das culturas, das alterações no solo e da segurança ambiental e alimentar. Objetivou-se analisar sistematicamente as evidências sobre o uso de lodo de esgoto tratado e biossólidos na produção de hortaliças. A revisão foi estruturada segundo o PRISMA 2020, com buscas em fontes bibliográficas e rastreamento complementar, sem restrição inicial de ano, considerando estudos experimentais com hortaliças e pelo menos um desfecho agronômico, edáfico ou de segurança. Dezenove artigos experimentais atenderam aos critérios estabelecidos após a busca ampliada e a busca reversa. Predominaram estudos com alface e espinafre, utilizando lodo estabilizado, biossólidos compostados ou caleados e biochar de lodo. Em geral, doses adequadas elevaram biomassa ou produtividade e melhoraram atributos como matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes e, em alguns casos, pH do solo. Entretanto, doses crescentes também elevaram a concentração ou disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos em parte dos estudos, com respostas dependentes do tipo de lodo, processamento, solo, dose e espécie vegetal. Conclui-se que os biossólidos

[1] COMO CITAR: (ABNT): BASTOS, T. M.; MACEDO JÚNIOR, A. O.; ANDRÉ JÚNIOR, J. Uso de Biossólidos de Estações de Tratamento de Esgoto na Produção de Hortaliças: Uma Revisão Sistemática. **JNT Facit Business and Technology Journal.** Qualis A2. ISSN: 2526-4281, Mês de Outubro de 2026 - Ed. 78. VOL. 01. Págs. 466-481. Disponível: http://revistas.faculdadefacit.edu.br. Acesso em: ___/___/___.

apresentam potencial agronômico para hortaliças, mas seu uso não pode ser generalizado como seguro sem caracterização prévia do material, definição agronômica da dose e monitoramento do solo e da parte comestível.

Palavras-chave: Biossólidos. Lodo de esgoto. Hortaliças. Qualidade do solo. Segurança alimentar.

ABSTRACT

Agricultural use of sewage sludge and biosolids may contribute to nutrient and organic matter recycling, but it requires joint assessment of crop performance, soil changes, and environmental and food safety. This systematic review evaluated evidence on treated sewage sludge and biosolids in vegetable production. The review was structured according to PRISMA 2020, using bibliographic searches and complementary reference tracking without an initial publication-year restriction. Experimental studies involving edible vegetables and at least one agronomic, soil, or safety outcome were eligible. Nineteen experimental articles met the eligibility criteria after the expanded search and backward reference searching. Lettuce and spinach predominated, and the amendments included stabilized sludge, composted or limed biosolids, and sewage-sludge biochar. Appropriate application rates generally increased biomass or yield and improved soil organic matter, nutrient availability, and, in some studies, soil pH. However, increasing rates also raised the concentration or availability of potentially toxic elements in some experiments, with responses depending on sludge characteristics, processing, soil, dose, and crop species. Biosolids therefore show agronomic potential for vegetable production, but their safe use requires prior material characterization, agronomically defined application rates, and monitoring of soil and edible plant tissues.

Keywords: Biosolids. sewage sludge. Vegetables. Soil quality. food safety.

INTRODUÇÃO

O crescimento da produção de lodo em estações de tratamento de esgoto amplia a necessidade de rotas de destinação que conciliem aproveitamento de recursos e controle de riscos ambientais. Entre as alternativas, a aplicação agrícola desperta interesse porque o material pode fornecer matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e outros nutrientes, reduzindo parcialmente a dependência de fertilizantes convencionais. Em hortaliças, entretanto, essa alternativa exige avaliação

particularmente cuidadosa, uma vez que várias espécies apresentam ciclo curto, elevada demanda nutricional e consumo direto de folhas, frutos ou órgãos subterrâneos.

Os resultados experimentais disponíveis demonstram que a resposta agronômica pode ser expressiva. Em alface, Lopes *et al.* (2005) observaram aumento do crescimento e da massa fresca com doses crescentes de lodo de esgoto. Sönmez e Bozkurt (2006) também verificaram incremento de produtividade e de características vegetativas da alface, associado ao aumento da disponibilidade de nutrientes no solo. Em trabalhos mais recentes, biossólidos e lodos submetidos a diferentes processos de estabilização mantiveram capacidade de fornecer nitrogênio e fósforo e favorecer a produção de alface (Arrobas *et al*., 2024; Rodrigues *et al.,* 2024).

O benefício agronômico, contudo, não pode ser analisado isoladamente. O lodo pode conter elementos potencialmente tóxicos e sua aplicação repetida ou em doses elevadas pode aumentar a concentração desses elementos no solo e sua transferência para tecidos vegetais. Em alface, espinafre, repolho e outras hortaliças, estudos relatam respostas dependentes da dose e do tipo de material, incluindo elevação de Cu, Zn, Cd, Pb ou Cr no solo ou nas plantas (Zhao *et al*., 2012; Kumar *et al*., 2016; Eid *et al*., 2017; Fei-Baffoe *et al.,* 2021; Swain *et al*., 2021). Por outro lado, tratamentos como compostagem, alcalinização e pirólise podem alterar a disponibilidade de nutrientes e contaminantes, modificando o balanço entre eficiência agronômica e segurança (Hirpassa e Codling, 2019; Velli *et al*., 2021; Arrobas *et al.,* 2024).

Essa variabilidade dificulta conclusões baseadas em estudos isolados. Espécie vegetal, parte comestível, propriedades do solo, origem do lodo, processo de estabilização, dose e tempo de cultivo interferem na resposta do sistema solo-planta. Assim, uma síntese sistemática permite identificar padrões, contrastes e lacunas relevantes para o planejamento de novos experimentos e para a definição de estratégias de uso agronômico mais criteriosas.

Diante desse contexto, formulou-se a seguinte pergunta de pesquisa: quais são os efeitos da aplicação de lodo de esgoto tratado e biossólidos na produção de hortaliças sobre o desempenho agronômico das culturas, os atributos do solo ou substrato e os indicadores de segurança ambiental e alimentar? Objetivou-se analisar sistematicamente as evidências científicas sobre o uso desses materiais na produção de hortaliças, integrando os efeitos agronômicos, as alterações do solo/substrato e os indicadores relacionados à segurança.

METODOLOGIA

Tipo e Desenho do Estudo

O estudo foi desenvolvido como revisão sistemática da literatura, com síntese qualitativa e quantitativa descritiva das evidências. O relato foi estruturado conforme as recomendações do PRISMA 2020. A realização de meta-análise foi avaliada após a extração dos dados, mas não foi considerada apropriada diante da heterogeneidade entre espécies, formas de processamento do lodo, doses, comparadores e medidas de desfecho.

Pergunta de Pesquisa

Quais são os efeitos da aplicação de lodo de esgoto tratado e biossólidos na produção de hortaliças sobre o desempenho agronômico das culturas, os atributos do solo ou substrato e os indicadores de segurança ambiental e alimentar?

Estrutura PICO

Elemento	Definição
P – População	Hortaliças destinadas à alimentação humana, cultivadas em solo ou substrato.
I – Intervenção	Aplicação de lodo de esgoto tratado, biossólido ou produto derivado diretamente de lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto.
C – Comparação	Ausência de aplicação, fertilização mineral ou orgânica convencional, ou diferentes doses e formas de tratamento do biossólido.
O – Desfechos	Desempenho agronômico; atributos do solo/substrato; indicadores de segurança ambiental e alimentar.

Desfechos de Interesse

Os desfechos foram organizados em três eixos. O eixo agronômico compreendeu produtividade, massa fresca e seca, altura, número de folhas, área foliar, desenvolvimento radicular, absorção de nutrientes e outras características produtivas. O eixo solo/substrato compreendeu pH, matéria orgânica ou carbono orgânico, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, capacidade de troca catiônica, condutividade elétrica, micronutrientes e atributos físicos ou biológicos, quando disponíveis. O eixo segurança compreendeu elementos potencialmente tóxicos, incluindo Cd, Pb, Cr, Ni, Cu, Zn, Hg e As, além de indicadores microbiológicos, patógenos, transferência solo-planta, concentração na parte comestível, bioacumulação e indicadores de risco à saúde, quando avaliados pelos estudos.

Estratégia de Busca e Seleção dos Estudos

A busca bibliográfica foi executada em 23 de setembro de 2026, com rastreamento de registros indexados ou disponibilizados em PubMed/MEDLINE, SciELO e ScienceDirect. O Google Scholar e outros indexadores acadêmicos foram utilizados de forma complementar para localizar estudos potencialmente elegíveis, conferir dados bibliográficos e realizar busca reversa nas referências dos artigos recuperados. Não foi aplicado limite inicial de ano de publicação. Foram considerados estudos em português, inglês e espanhol.

Descritores e Estratégia de Busca

Os termos de busca foram definidos a partir dos conceitos centrais da pergunta PICO e da terminologia empregada nos estudos da área. Foram combinados termos relacionados ao resíduo (“sewage sludge”, biosolid*, “sewage sludge compost”, “sewage sludge biochar”, “lodo de esgoto”, biossólido*), às culturas (vegetable*, horticultur*, lettuce, cabbage, spinach, carrot, beetroot, tomato, “leafy vegetable*”, hortaliça*, alface, repolho, espinafre, cenoura, beterraba, tomate) e aos desfechos (yield, growth, biomass, soil, nutrient*, “heavy metal*”, “trace element*”, pathogen*, safety, risk, produtividade, crescimento, biomassa, solo, nutriente*, “metais pesados”, “elementos-traço”, patógeno*, segurança, risco). Os operadores booleanos AND e OR foram utilizados conforme a sintaxe disponível em cada fonte.

String Principal em Inglês

("sewage sludge" OR biosolid* OR "sewage sludge compost" OR "sewage sludge biochar") AND (vegetable* OR horticultur* OR lettuce OR cabbage OR carrot OR beetroot OR tomato OR "leafy vegetable*") AND (yield OR growth OR biomass OR soil OR nutrient* OR "heavy metal*" OR "trace element*" OR pathogen* OR safety OR risk)

String Principal em Português

("lodo de esgoto" OR biossólido* OR biossolido* OR "composto de lodo de esgoto" OR "biochar de lodo de esgoto") AND (hortaliça* OR alface OR repolho OR cenoura OR beterraba OR tomate) AND (produtividade OR crescimento OR biomassa OR solo OR nutriente* OR "metais pesados" OR "elementos-traço" OR patógeno* OR segurança OR risco)

Adaptação por Base

No PubMed/MEDLINE foram priorizadas combinações dos termos em inglês e a conferência dos registros indexados. Na SciELO foram empregadas combinações em português e inglês. Na ScienceDirect foram utilizadas combinações equivalentes dos três blocos conceituais. No Google Scholar e em indexadores complementares foram empregadas combinações mais curtas dos conceitos centrais, exclusivamente para rastreamento adicional e conferência bibliográfica. Também foi realizada busca reversa nas referências de estudos pertinentes.

Processo de Seleção

Os registros recuperados foram submetidos à remoção de duplicatas por título, DOI e autoria. A seleção ocorreu em duas etapas: triagem por título e resumo e avaliação do texto completo ou, quando o texto integral não estava aberto, das informações metodológicas e dos resultados disponíveis em página editorial/indexadora confiável. Foram mantidos somente estudos que atenderam aos critérios de elegibilidade e apresentaram dados experimentais diretamente relacionados à aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado em hortaliças. Registros de revisão, teses e dissertações foram utilizados apenas para rastreamento de referências e não integraram a síntese principal.

Critérios de Inclusão

Foram incluídos estudos experimentais primários publicados em periódicos científicos que: (i) avaliaram hortaliças destinadas à alimentação humana; (ii) utilizaram lodo de esgoto sanitário tratado, biossólido, composto de lodo ou biochar produzido diretamente de lodo de ETE como intervenção; (iii) apresentaram controle, fertilização de referência ou comparação entre doses/formas de aplicação; e (iv) relataram pelo menos um desfecho relacionado ao desempenho agronômico, aos atributos do solo/substrato ou à segurança ambiental/alimentar. Foram aceitos experimentos conduzidos em vasos, casa de vegetação e campo.

Critérios de Exclusão

Foram excluídos artigos de revisão, editoriais, resumos de congresso sem artigo completo, teses e dissertações; trabalhos exclusivamente com culturas não hortícolas; estudos que utilizaram somente efluente líquido ou água residuária; lodos exclusivamente industriais sem origem sanitária claramente identificada; estudos

sem cultivo vegetal; experimentos de fitorremediação sem finalidade de produção alimentar; estudos nos quais não foi possível separar o efeito do material derivado de lodo de esgoto; e publicações sem informações suficientes para caracterizar a intervenção e pelo menos um dos desfechos de interesse.

Extração dos Dados

Dos estudos elegíveis foram extraídos: autoria e ano; país; espécie vegetal; ambiente experimental; origem e tratamento do lodo/biossólido; forma de processamento; dose; comparador; delineamento e repetições quando informados; variáveis agronômicas; atributos do solo; concentrações de elementos potencialmente tóxicos; indicadores de transferência ou bioacumulação; indicadores de risco quando disponíveis; e principais resultados. As informações foram organizadas nos três domínios previamente definidos: resposta agronômica, qualidade do solo/substrato e segurança ambiental/alimentar.

Avaliação da Qualidade Metodológica

A qualidade metodológica foi examinada de forma descritiva, considerando a clareza da origem e do tratamento do lodo, caracterização química do material, caracterização do solo/substrato, presença de controle ou comparador, definição das doses, replicação, descrição do delineamento, métodos analíticos para nutrientes e contaminantes, adequação da análise estatística e completude do relato. A heterogeneidade dos delineamentos, doses, formas de processamento e desfechos impediu a atribuição de uma pontuação única com interpretação universal; por isso, esses aspectos foram utilizados na apreciação crítica da robustez e comparabilidade das evidências.

Síntese dos Resultados

Os resultados foram sintetizados de forma narrativa e quantitativa descritiva, agrupando os achados em resposta agronômica, qualidade do solo/substrato e segurança ambiental/alimentar. As formas de aplicação foram diferenciadas em lodo tratado/estabilizado, composto ou biossólido compostado, lodo caleado e biochar derivado de lodo quando essa informação estava disponível.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seleção dos Estudos

Após a aplicação dos critérios de elegibilidade e a remoção de registros duplicados identificados durante o rastreamento, foram selecionados 19 artigos experimentais diretamente pertinentes à pergunta da revisão. A amostra incluiu diferentes hortaliças folhosas, raízes e hortaliças de fruto, com predominância de estudos com alface e espinafre, conduzidos em diferentes países e utilizando lodo de esgoto, biossólidos compostados ou caleados e biochar derivado de lodo (Tabela 1).

A maioria dos trabalhos avaliou simultaneamente a resposta agronômica e algum componente de segurança, principalmente a concentração de elementos potencialmente tóxicos. A ampliação da busca identificou estudos elegíveis adicionais que não constavam da versão preliminar, incluindo experimentos com hortaliças folhosas chinesas, Beta vulgaris, avaliação microbiológica de alface, cenoura, rabanete e tomate, resistência antimicrobiana em hortaliças e avaliação fisiológica e de elementos-traço em alface.

Tabela 1: Caracterização dos estudos selecionados para a síntese.

Estudo	País	Hortaliça	Intervenção principal	Domínios
Lopes *et al*. (2005)	Brasil	Alface	Lodo de esgoto, doses crescentes	Agronômico; segurança
Sönmez e Bozkurt (2006)	Turquia	Alface	Lodo de esgoto 20–80 t ha^{-1}; ácido húmico	Agronômico; solo; segurança
Zhao *et al*. (2012)	China	Alface	Composto de lodo; doses e combinação com NPK	Agronômico; solo; segurança
Kumar, Chopra e Srivastava (2016)	Índia	Espinafre	Solo com diferentes proporções de lodo	Agronômico; solo; segurança
Wang *et al.* (2016)	China	Espinafre-d'água e cebolinha-chinesa	Lodo 0–16% no solo	Agronômico; solo; segurança
Eid *et al.* (2017)	Arábia Saudita	Espinafre	Lodo 0–50 g kg^{-1}	Agronômico; solo; segurança
Hirpassa e Codling (2019)	Estados Unidos	Alface	Biossólido caleado/compostado 40–80 t ha^{-1}	Agronômico; segurança
Lima *et al*. (2020)	Brasil	Alface	Biochar de lodo 10–30 t ha^{-1}	Agronômico
Fei-Baffoe *et al*. (2021)	Gana	Alface e repolho	Doses baseadas em N	Agronômico; solo; segurança
Swain *et al.* (2021)	Índia	Espinafre	Lodo 0–40 t ha^{-1}	Agronômico; solo; segurança/risco
Velli, Manolikaki e Diamadopoulos (2021)	Grécia	Tomate	Biochar de lodo, composto e combinação	Agronômico; solo; segurança
Arrobas *et al.* (2024)	Portugal	Alface	Lodos de duas ETEs e tratamentos de sanitização	Agronômico; solo; segurança
Rodrigues *et al.* (2024)	Portugal	Alface	Lodos tratados/sem tratamento; esterco e N mineral	Agronômico; solo; segurança

Chui *et al*. (1992)	Hong Kong	Alface; couves chinesas	Lodo municipal digerido, 50–200 Mg ha^{-1}	Agronômico; segurança
Singh e Agrawal (2007)	Índia	Palak (Beta vulgaris)	Lodo a 20 e 40% (m/m)	Agronômico; solo; segurança
Rahube *et al.* (2014)	Canadá	Alface; cenoura; rabanete; tomate	Lodo bruto e biossólido classe B	Segurança microbiológica
Murray *et al.* (2019)	Canadá	Alface; cenoura; rabanete	Biossólidos classes A e B, diferentes estabilizações	Segurança microbiológica
Oliveira *et al.* (2021)	Brasil	Alface; cenoura	Lodo tratado por secagem em estufa agrícola	Segurança microbiológica
Ceccanti *et al.* (2022)	Itália	Alface	Lodo a 10 e 20% (m/m)	Agronômico; fisiológico; segurança

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

Caracterização dos Estudos Selecionados

Os estudos selecionados foram publicados entre 1992 e 2024 e apresentaram grande diversidade de doses, formas de tratamento do lodo e condições experimentais. Predominaram experimentos em vasos ou casa de vegetação, embora também tenham sido identificados ensaios de campo. Essa heterogeneidade foi considerada na interpretação dos resultados e inviabilizou uma meta-análise única.

Efeitos sobre o Desempenho Agronômico das Hortaliças

A resposta agronômica foi predominantemente positiva em faixas de aplicação moderadas, embora a magnitude tenha variado entre espécies e materiais. Em alface, Lopes *et al.* (2005) verificaram crescimento da parte aérea e massa fresca superiores ao controle com doses crescentes de lodo. Sönmez e Bozkurt (2006) observaram aumento de produtividade, circunferência e altura da cabeça e número de folhas após aplicação de lodo ou esterco. Zhao *et al.* (2012) também registraram incremento de biomassa com composto de lodo, mas o tratamento apenas com composto, na dose recomendada, produziu menos biomassa que a fertilização NPK, enquanto a coaplicação apresentou desempenho semelhante ou superior ao fertilizante mineral.

Estudos adicionais ampliaram a diversidade de espécies e respostas. Chui *et al*. (1992) avaliaram quatro hortaliças folhosas e observaram diferenças entre espécies na acumulação de metais, com aumento significativo de produtividade em couve-chinesa. Em contraste, Singh e Agrawal (2007) verificaram que proporções elevadas de lodo em palak (Beta vulgaris) aumentaram a contaminação por Cd, Ni e Zn e reduziram características fisiológicas e a produtividade. Ceccanti *et al.* (2022) observaram maior biomassa e desempenho fotossintético da alface, sendo a

proporção de 10% considerada melhor compromisso entre crescimento e exposição a elementos-traço no experimento.

Em espinafre, os resultados reforçaram a existência de resposta dependente da dose. Kumar *et al.* (2016) observaram melhor desempenho agronômico em concentração intermediária de lodo, enquanto Eid *et al.* (2017) registraram aumento de biomassa e crescimento até 40 g kg^{-1}. Swain et al. (2021) encontraram maior biomassa em 20 t ha^{-1}, porém a análise de segurança indicou que doses inferiores eram mais prudentes. Em espinafre-d'água e cebolinha-chinesa, Wang *et al.* (2016) verificaram máximos de massa seca em proporções diferentes de lodo, demonstrando que a dose ótima não é transferível diretamente entre espécies.

Os materiais processados também apresentaram potencial. Hirpassa e Codling (2019) observaram maior rendimento de alface com biossólidos caleados ou compostados em comparação ao controle. Lima *et al.* (2020) relataram aumento progressivo da produção e da eficiência de uso da água da alface com biochar de lodo. Em tomate, Velli *et al.* (2021) observaram aumento da biomassa vegetativa e melhoria de propriedades do solo, mas sem incremento significativo da produção de frutos. Nos estudos portugueses de 2024, o fornecimento de nitrogênio pelo lodo foi determinante para a resposta da alface, embora a fertilização mineral nitrogenada tenha apresentado produção superior em determinadas comparações (Arrobas *et al.,* 2024; Rodrigues *et al*., 2024).

Em conjunto, os estudos indicam que o potencial fertilizante do lodo está associado principalmente ao aporte de nitrogênio, fósforo, matéria orgânica e outros nutrientes. Entretanto, a relação dose-resposta não é necessariamente linear. Doses excessivas podem reduzir o crescimento por salinidade, desequilíbrio nutricional ou aumento da disponibilidade de elementos potencialmente tóxicos. Portanto, os resultados não sustentam uma dose universal para hortaliças; a recomendação deve considerar a caracterização do material, a exigência da cultura e as propriedades do solo.

Efeitos sobre a Qualidade do Solo e/ou Substrato

A aplicação de lodo e biossólidos modificou de forma consistente atributos químicos do solo. Sönmez e Bozkurt (2006) registraram aumento de matéria orgânica, condutividade elétrica, nitrogênio total, fósforo disponível e potássio trocável. Fei-Baffoe *et al.* (2021) também observaram aumento significativo da matéria orgânica e da condutividade com o incremento das doses utilizadas para alface e repolho. Em solo vermelho ácido, Wang *et al.* (2016) verificaram melhoria das

condições para crescimento das hortaliças, acompanhada, contudo, de aumento progressivo de Cu e Zn no solo.

O efeito sobre o pH dependeu do processamento do material e das características iniciais do solo. Em alguns experimentos o pH apresentou pouca alteração, enquanto lodos submetidos à alcalinização elevaram o pH e a disponibilidade de Ca, efeito potencialmente favorável em solos ácidos (Arrobas *et al.,* 2024; Rodrigues *et al*., 2024). Em contraste, Eid *et al.* (2017) registraram redução do pH e aumento da condutividade elétrica e da matéria orgânica com doses crescentes de lodo. Esses resultados demonstram que a expressão 'lodo de esgoto' reúne materiais quimicamente distintos e que o processo de estabilização precisa ser tratado como variável central.

O biochar derivado de lodo apresentou comportamento particular. Velli, Manolikaki e Diamadopoulos (2021) observaram aumento de carbono orgânico total, nitrogênio e fósforo disponível após sua aplicação, enquanto Lima *et al*. (2020) verificaram resposta produtiva crescente da alface. A pirólise altera a matriz orgânica e pode modificar a mobilidade dos elementos presentes no material; por isso, biochar de lodo não deve ser interpretado como equivalente ao lodo estabilizado ou ao composto.

De forma geral, a revisão indica melhoria de fertilidade e matéria orgânica, mas também evidencia que condutividade elétrica e teores totais ou disponíveis de metais podem aumentar com a dose. Assim, a qualidade do solo deve ser avaliada de maneira integrada: ganhos de fertilidade não eliminam a necessidade de monitoramento de salinidade e contaminantes.

Segurança Ambiental e Alimentar do uso de Biossólidos

A segurança foi o domínio com maior variação entre os estudos. Em alface cultivada com composto de lodo, Zhao *et al*. (2012) observaram aumento de Cu, Zn e Pb nos tecidos e aumento de metais totais e extraíveis no solo; entretanto, a coaplicação com fertilizante mineral apresentou melhor equilíbrio entre biomassa e acúmulo de metais. Sönmez e Bozkurt (2006) verificaram aumento de Cd foliar nos tratamentos com lodo, embora o ácido húmico tenha reduzido sua disponibilidade em algumas condições.

Nos estudos com espinafre, o aumento da dose esteve frequentemente associado ao aumento da concentração de metais. Kumar *et al.* (2016) registraram incremento de Cd, Cr, Cu, Mn e Zn na planta à medida que a proporção de lodo aumentou. Eid *et al*. (2017) observaram elevação da concentração de metais nas

raízes e parte aérea, embora a maior parte permanecesse abaixo de níveis fitotóxicos e os fatores de bioacumulação fossem inferiores a 1. Swain *et al*. (2021) apresentaram o sinal de alerta mais evidente: doses a partir de 20 t ha^{-1} produziram maior biomassa, mas Zn e Cd excederam limites considerados seguros nas folhas, e indicadores de risco para Pb aumentaram nas doses superiores.

Em alface e repolho, Fei-Baffoe *et al*. (2021) observaram aumento da absorção de Pb, Zn e Cu com a dose. Os autores relataram concentrações de Zn e Cu abaixo dos limites utilizados como referência, mas valores de Pb acima do limite de 0,3 mg kg^{-1} considerado no estudo. Esse resultado é importante porque demonstra que maior produtividade não significa automaticamente maior segurança alimentar. Em contraste, Hirpassa e Codling (2019) verificaram que as concentrações de metais na alface permaneceram dentro da faixa encontrada comercialmente, e os estudos portugueses de 2024 relataram baixos teores de metais nos lodos avaliados e ausência de aumento relevante nas plantas para a maioria dos elementos (Arrobas *et al.,* 2024; Rodrigues *et al.,* 2024).

O processamento térmico também mostrou potencial para reduzir a transferência de determinados elementos. Em tomate, Velli *et al.* (2021) encontraram baixas concentrações de metais nos tecidos e ausência de excedência dos limites adotados, embora As, Mo e Pb tenham sido detectados nos frutos. A presença de contaminantes, mesmo abaixo de limites de referência, reforça a necessidade de caracterização lote a lote e de avaliação específica da parte comestível.

A busca ampliada mostrou que a segurança não se restringe aos metais. Rahube *et al*. (2014) avaliaram alface, cenoura, rabanete e tomate cultivados em parcelas fertilizadas com lodo municipal não tratado ou biossólidos classe B e detectaram, na safra de aplicação, genes associados à resistência antimicrobiana em hortaliças provenientes de parcelas tratadas. Murray *et al*. (2019) demonstraram que processos de estabilização de biossólidos influenciaram a abundância e a persistência de bactérias e genes de resistência, com menor carga em materiais classe A do que em biossólidos classe B. No Brasil, Oliveira *et al.* (2021) avaliaram alface e cenoura cultivadas com lodo tratado e observaram ausência de colifagos somáticos e vírus entéricos cultiváveis nas amostras de alface ao final do cultivo. Esses resultados mostram que o tratamento do lodo é variável central para a segurança microbiológica e justificam a inclusão de indicadores microbiológicos e de resistência antimicrobiana em futuros estudos.

Potencial Agronômico, Limitações e Lacunas de Conhecimento

A síntese revela um padrão consistente: lodo de esgoto e biossólidos podem atuar como fontes de nutrientes e matéria orgânica e elevar a produtividade de hortaliças, mas a margem entre benefício agronômico e risco depende da composição do material e da dose. A heterogeneidade observada impede extrapolar diretamente resultados de um biossólido para outro, mesmo quando a cultura é a mesma.

Uma limitação importante da literatura é a predominância de experimentos de curta duração e em vasos. Esse desenho é útil para identificar respostas iniciais, porém representa de forma limitada os efeitos cumulativos de aplicações sucessivas, a dinâmica de contaminantes no perfil do solo e as interações com clima e manejo. Também há forte concentração de estudos em hortaliças folhosas, especialmente alface e espinafre, enquanto raízes e outras hortaliças consumidas cruas são menos representadas.

Outra lacuna é a ausência de padronização das doses. Os trabalhos utilizaram porcentagem de lodo no solo, g kg^{-1}, t ha^{-1} ou doses calculadas pelo fornecimento de nitrogênio. Para futuros experimentos, a definição da dose com base na caracterização química e sanitária do biossólido, na disponibilidade de nitrogênio e na necessidade da cultura oferece maior comparabilidade e segurança do que proporções arbitrárias.

Para o planejamento de estudos futuros com biossólidos de ETE, a evidência disponível sustenta a avaliação simultânea de produtividade e crescimento, fertilidade e salinidade do solo, teores de elementos potencialmente tóxicos no solo e na parte comestível e, quando possível, indicadores microbiológicos. Ensaios com mais de um ciclo de cultivo também são necessários para avaliar efeito residual e possível acúmulo de contaminantes.

CONCLUSÕES

Os estudos selecionados demonstram que lodo de esgoto tratado e biossólidos apresentam potencial para fornecer nutrientes, elevar a matéria orgânica do solo e aumentar o crescimento ou a produtividade de diferentes hortaliças.

O uso agrícola desses materiais em hortaliças requer caracterização química e sanitária prévia, definição da dose com base em critérios agronômicos e monitoramento do solo e da parte comestível.

Persistem lacunas relacionadas a aplicações sucessivas, efeitos de longo prazo, contaminantes orgânicos e microbiológicos e culturas além das hortaliças folhosas.

REFERÊNCIAS

ARROBAS, M.; MENESES, R.; GUSMÃO, A. G.; DA SILVA, J. M.; CORREIA, C. M.; RODRIGUES, M. Â. Nitrogen-Rich Sewage Sludge Mineralized Quickly, Improving Lettuce Nutrition and Yield, with Reduced Risk of Heavy Metal Contamination of Soil and Plant Tissues. **Agronomy**, v. 14, n. 5, p. 924, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14050924. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy14050924. Acesso em: 10 set. 2026.

CECCANTI, C.; LAURIA, G.; LO PICCOLO, E.; GUIDI, L.; PEZZAROSSA, B.; ROSELLINI, I.; CARDELLI, R.; BECAGLI, M.; LANDI, M. Assessment of leaf photosynthetic performances and bioaccumulation of trace metals by lettuce leaves and strawberry fruits amended with sewage sludge: Which possible re-use in agriculture? **Scientia Horticulturae**, v. 295, p. 110884, 2022. DOI: 10.1016/j.scienta.2022.110884. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110884. Acesso em: 23 ago. 2026.

CHUI, V. W. D.; LAM-LEUNG, S. Y.; CHEUNG, M.; WU, V. K. C. The use of sewage sludge as basal dressing for vegetable cultivation. **Environment International**, v. 18, n. 2, p. 201-209, 1992. DOI: 10.1016/0160-4120(92)90007-Q. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0160-4120(92)90007-Q. Acesso em: 20 jun. 2026.

EID, E. M.; EL-BEBANY, A. F.; ALRUMMAN, S. A.; HESHAM, A. E.-L.; TAHER, M. A.; FAWY, K. F. Effects of different sewage sludge applications on heavy metal accumulation, growth and yield of spinach (*Spinacia oleracea* L.). **International Journal of Phytoremediation**, v. 19, n. 4, p. 340-347, 2017. DOI: 10.1080/15226514.2016.1225286. Disponível em: https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1225286. Acesso em: 12 mai. 2026.

FEI-BAFFOE, B.; AMO-ASARE, J.; SULEMANA, A.; MIEZAH, K. Levels of Lead, Copper, and Zinc in Cabbage (*Brassica oleracea* sp.) and Lettuce (*Lactuca sativa* sp.) Grown on Soil Amended with Sewage Sludge. **Journal of Environmental and Public Health**, v. 2021, p. 8386218, 2021. DOI: 10.1155/2021/8386218. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2021/8386218. Acesso em: 23 set. 2026.

HIRPASSA, W. D.; CODLING, E. E. Growth and Metal Uptake of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) on Soil Amended with Biosolids and Gypsum. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, n. 16, p. 2033-2040, 2019. DOI: 10.1080/00103624.2019.1648662. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1648662. Acesso em: 20 jul. 2026.

KUMAR, V.; CHOPRA, A. K.; SRIVASTAVA, S. Assessment of Heavy Metals in Spinach (*Spinacia oleracea* L.) Grown in Sewage Sludge-Amended Soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, n. 2, p. 221-236, 2016. DOI: 10.1080/00103624.2015.1122799. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1122799. Acesso em: 09 set. 2026.

LIMA, J. R. S.; ARAÚJO, M. B.; OLIVEIRA, C. L.; BARROS, C. T.; AMORIM, A. S.; BEZERRA, A. L.; DILL, P. R. J.; MEDEIROS, É. V.; HAMMECKER, C.; ANTONINO, A. C. D.; LEITE, M. C. B. S. Biochar de Lodo de Esgoto Aumenta a Produção e Eficiência no Uso de Água da Alface. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 4, p. 1720-1729,

2020. DOI: 10.26848/rbgf.v13.4.p1720-1729. Disponível em: https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.4.p1720-1729. Acesso em: 05 set. 2026.

LOPES, J. C.; RIBEIRO, L. G.; ARAÚJO, M. G.; BERALDO, M. R. B. S. Produção de alface com doses de lodo de esgoto. **Horticultura Brasileira**, v. 23, n. 1, p. 143-147, 2005. DOI: 10.1590/S0102-05362005000100030. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0102-05362005000100030. Acesso em: 14 mar. 2026.

MURRAY, R.; TIEN, Y.-C.; SCOTT, A.; TOPP, E. The impact of municipal sewage sludge stabilization processes on the abundance, field persistence, and transmission of antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes to vegetables at harvest. **Science of the Total Environment**, v. 651, pt. 2, p. 1680-1687, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.030. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.030. Acesso em: 13 set. 2026.

OLIVEIRA, J. F.; FUJI, K.; BEVILACQUA, P. D. Caracterização da exposição humana a lodo de esgoto sanitário na cadeia: tratamento, uso agrícola e consumo de hortaliças. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 2, p. 303-312, 2021. DOI: 10.1590/S1413-415220190208. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S1413-415220190208. Acesso em: 08 ago. 2026.

RAHUBE, T. O.; MARTI, R.; SCOTT, A.; TIEN, Y.-C.; MURRAY, R.; SABOURIN, L.; ZHANG, Y.; DUENK, P.; LAPEN, D. R.; TOPP, E. Impact of fertilizing with raw or anaerobically digested sewage sludge on the abundance of antibiotic-resistant coliforms, antibiotic resistance genes, and pathogenic bacteria in soil and on vegetables at harvest. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 80, n. 22, p. 6898-6907, 2014. DOI: 10.1128/AEM.02389-14. Disponível em: https://doi.org/10.1128/AEM.02389-14. Acesso em: 18 abr. 2026.

RODRIGUES, M. Â.; SAWIMBO, A.; DA SILVA, J. M.; CORREIA, C. M.; ARROBAS, M. Sewage Sludge Increased Lettuce Yields by Releasing Valuable Nutrients While Keeping Heavy Metals in Soil and Plants at Levels Well below International Legislative Limits. **Horticulturae**, v. 10, n. 7, p. 706, 2024. DOI: 10.3390/horticulturae10070706. Disponível em: https://doi.org/10.3390/horticulturae10070706. Acesso em: 16 jul. 2026.

SINGH, R. P.; AGRAWAL, M. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of *Beta vulgaris* plants. **Chemosphere**, v. 67, n. 11, p. 2229-2240, 2007. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.12.019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.019. Acesso em: 20 set. 2026.

SÖNMEZ, F.; BOZKURT, M. A. Lettuce grown on calcareous soils benefit from sewage sludge. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, v. 56, n. 1, p. 17-24, 2006. DOI: 10.1080/09064710510005813. Disponível em: https://doi.org/10.1080/09064710510005813. Acesso em: 18 set. 2026.

SWAIN, A.; SINGH, S. K.; MOHAPATRA, K. K.; PATRA, A. Sewage sludge amendment affects spinach yield, heavy metal bioaccumulation, and soil pollution indexes. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, p. 717, 2021. DOI: 10.1007/s12517-021-07078-3. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12517-021-07078-3. Acesso em: 12 set. 2026.

VELLI, P.; MANOLIKAKI, I.; DIAMADOPOULOS, E. Effect of biochar produced from sewage sludge on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) growth, soil chemical properties and heavy metal concentrations. **Journal of Environmental Management**, v. 297, p. 113325, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113325. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113325. Acesso em: 07 ago. 2026.

WANG, R.; TANG, A.; ASHRAF, M. A. The effects of applying sewage sludge into Jiangxi red soil on the growth of vegetables and the migration and enrichment of Cu and Zn. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 23, n. 5, p. 660-666, 2016. DOI: 10.1016/j.sjbs.2015.10.028. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.10.028. Acesso em: 21 set. 2026.

ZHAO, X. L.; MU, Z. J.; CAO, C. M.; WANG, D. Y. Growth and Heavy-Metal Uptake by Lettuce Grown in Soils Applied with Sewage Sludge Compost. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, n. 11, p. 1532-1541, 2012. DOI: 10.1080/00103624.2012.675390. Disponível em: https://doi.org/10.1080/00103624.2012.675390. Acesso em: 16 abr. 2026.