

USO DE LODO DE ESGOTO NA AGRICULTURA E IMPACTOS NA SAÚDE PÚBLICA NO BRASIL

SEWAGE SLUDGE USE IN AGRICULTURE AND ITS IMPACTS ON PUBLIC HEALTH IN BRAZIL

DOI: <https://doi.org/10.31692/2764-3425.v5i1.689>

¹CAMILA DA SILVA SERRA COMINETI

Doutora, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS); Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil;
ORCID: 0000-0003-0873-6998; camila.serra@ufms.br.

²MADALENA MARIA SCHLINDWEIN

Doutora, Programa de Pós-Graduação em Agronegócios. Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD);
Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil; ORCID: 0000-0002-4387-9786; madalenaschlindwein@ufgd.edu.br.

³PAULO HENRIQUE DE OLIVEIRA HOECKEL

Doutor, Programa de Pós-Graduação em Agronegócios. Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD);
Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil; ORCID: 0000-0002-1017-8975; paulohoeckel@ufgd.edu.br.

RESUMO

O uso de lodo de esgoto na agricultura pode trazer benefícios econômicos e ambientais, mas também levanta questões sobre saúde pública. A Instrução Normativa nº 61/2020, estabelece regras para o uso de biofertilizantes na agricultura. Esta, visa garantir a segurança e a eficácia desses produtos, regulamentando seu uso para prevenir impactos negativos socioambientais. Este estudo investiga o impacto do uso de lodo de esgoto tratado e não tratado na agricultura sobre as despesas com saúde nos municípios brasileiros. O intuito é entender se a prática de utilizar lodo de esgoto, influencia os gastos municipais com saúde, considerando diferentes contextos locais. Para isso, foi utilizado um modelo de Diferenças em Diferenças (DiD), que permitiu comparar a evolução das despesas com saúde entre municípios que utilizam lodo de esgoto e aqueles que não utilizam, antes e depois da implementação da prática, nos anos de 1995 a 2021. A análise DiD foi realizada para três diferentes tamanhos de municípios (pequenos, médios e grandes), explorando possíveis heterogeneidades nos efeitos do tratamento. Os resultados indicam que, em 2017, 215 municípios brasileiros declararam utilizar lodo de esgoto na agricultura. Em 2020, a prática continuou a ser adotada por outros 54 municípios formalmente registrados, indicando uso seguro. A análise DiD revelou que o uso de lodo teve impactos distintos nas despesas com saúde, dependendo do tamanho do município. Nos municípios pequenos, a utilização de lodo tratado mostrou efeito significativo no aumento das despesas com saúde. Nos municípios médios, o lodo tratado indicou possível aumento nas despesas com saúde, enquanto o tratamento de esgoto foi associado a redução significativa nas despesas com saúde. Nos grandes municípios, os efeitos não foram significativos, possivelmente devido à maior robustez dos sistemas de saúde e à capacidade de absorver impactos sem grandes variações nos gastos. O aumento dos gastos com saúde em 2017, mesmo com o uso do lodo tratado, evidencia possíveis falhas no tratamento de esgoto. O aumento das despesas com saúde durante a pandemia de COVID-19 pode ter obscurecido os efeitos do tratamento com lodo em 2020. Embora a adoção de práticas seguras do uso de lodo possa promover sustentabilidade ambiental e econômica, e até mesmo beneficiar a saúde, é necessário cuidado e aumento do controle de uso, especialmente na agricultura, para assegurar a segurança alimentar da população. Mesmo com a normativa é possível que haja mais municípios utilizando o lodo de esgoto sem controle.

Palavras-chave: Segurança alimentar; biofertilizante; lodo de esgoto; sustentabilidade; causalidade.

ABSTRACT

The use of sewage sludge in agriculture can bring economic and environmental benefits but also raises public health concerns. Normative Instruction No. 61/2020 establishes regulations for the use of biofertilizers in agriculture, aiming to ensure the safety and efficacy of these products while preventing socio-environmental impacts. This study investigates the impact of using treated and untreated sewage sludge in agriculture on healthcare expenditures in Brazilian municipalities. The objective is to determine whether the practice of using sewage sludge influences municipal health expenditures, considering different local

contexts. To achieve this, a Difference-in-Differences (DiD) model was employed, allowing for a comparison of the evolution of health expenditures between municipalities using sewage sludge and those that do not, before and after the adoption of this practice, over the years 1995 to 2021. The DiD analysis was conducted for three categories of municipalities (small, medium, and large) to explore potential heterogeneities in treatment effects. The results indicate that, in 2017, 215 Brazilian municipalities reported using sewage sludge in agriculture. By 2020, the practice was adopted by an additional 54 municipalities formally

registered, suggesting safe use. The DiD analysis revealed distinct impacts on health expenditures depending on the municipality size. In small municipalities, the use of treated sludge significantly increased health expenditures. In medium-sized municipalities, treated sludge also indicated a potential increase in health expenditures, while sewage treatment was associated with a significant reduction in such expenses. In large municipalities, no significant effects were observed, likely due to the greater resilience of their healthcare systems, which can absorb impacts without substantial variations in expenditures. The observed increase in health expenditures in 2017,

even with the use of treated sludge, highlights potential inefficiencies in sewage treatment. Additionally, the rise in health expenditures during the COVID-19 pandemic may have obscured the effects of sludge use in 2020. While the adoption of safe practices for sludge use can promote environmental and economic sustainability and even health benefits, greater caution and enhanced control are required, particularly in agriculture, to ensure food safety. Despite existing regulations, it is possible that more municipalities are using sewage sludge without proper oversight.

Keywords: Food safety; biofertilizer; sewage sludge; sustainability; causality.

INTRODUÇÃO

A universalização do acesso ao esgoto sanitário é um dos maiores desafios enfrentados pelo Brasil, especialmente no contexto da Agenda 2030, cujo o objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS) 6 visa garantir disponibilidade e o manejo sustentável da água e saneamento para todos (ONU, 2024). Em 2017, aproximadamente 76% dos municípios brasileiros descartaram águas residuais sem qualquer tipo de tratamento, revelando um cenário preocupante que compromete a saúde pública e o meio ambiente (IBGE, 2020). Embora o tratamento de esgoto tenha o potencial de melhorar significativamente a qualidade de vida, o alto custo de instalação e manutenção das infraestruturas de saneamento representa um obstáculo significativo, sobretudo em regiões mais vulneráveis (WHO/UNICEF, 2021).

Nesse cenário, a reutilização dos resíduos de esgoto, especialmente o lodo, apresenta uma oportunidade estratégica para enfrentar tanto os desafios ambientais quanto econômicos. O Brasil é altamente dependente da importação de fertilizantes químicos para sustentar sua vasta produção agrícola, enfrenta uma vulnerabilidade econômica crítica. A utilização do lodo de esgoto como biofertilizante representa uma alternativa promissora, permitindo a substituição de fertilizantes químicos importados por uma fonte renovável e local de nutrientes (Brasil, 2020b).

Além de contribuir para a sustentabilidade do setor agrícola, a transformação do lodo em biofertilizantes promove uma economia circular, monetizando resíduos que, de outra forma, seriam descartados de maneira convencional. No Brasil, essa prática é regulamentada pela Instrução Normativa nº 61/2020, que estabelece critérios para garantir a segurança ambiental e sanitária na aplicação desses materiais na agricultura (Brasil, 2020a; Brasil, 2020b; Brasil,

2022). Apesar dos avanços regulatórios, os desafios persistem, como o cumprimento das normas e as facilidades sociais. Dados de 2017 indicam que 5% dos municípios brasileiros utilizavam na agricultura o lodo sem tratamento adequado, ampliando os riscos de impactos negativos na saúde e no meio ambiente (IBGE, 2020).

A adoção de práticas sustentáveis no reaproveitamento do lodo também está alinhada com os princípios da economia circular, que busca transformar resíduos em insumos produtivos. No Brasil, a produção de biofertilizantes a partir de lodo representa um avanço em direção à monetização de resíduos que, de outra forma, seriam descartados de forma convencional (Comineti, Schlindwein e Hoeckel, 2024). No entanto, ainda é necessário investigar os efeitos colaterais dessa prática, particularmente no que se refere à saúde pública.

A relação entre o uso do lodo de esgoto na agricultura e as despesas com saúde nos municípios brasileiros é uma questão relevante que ainda carece de aprofundamento. Compreender se essa prática, regulamentada ou não pela Instrução Normativa nº 61, influencia nos gastos municipais com saúde, considerando diferentes contextos locais, é essencial para atender às exigências legais e aos objetivos de sustentabilidade. Este estudo, portanto, investiga o impacto do uso de lodo de esgoto tratado e não tratado na agricultura sobre as despesas com saúde nos municípios brasileiros. A pesquisa busca promover um modelo de economia circular capaz de converter desafios ambientais e econômicos em oportunidades sustentáveis, contribuindo para a formulação de políticas públicas mais eficazes.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O tratamento de esgoto e a gestão do lodo são questões centrais na agenda global de sustentabilidade. O lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs) é frequentemente considerado um subproduto problemático devido ao seu volume e potencial contaminante. No entanto, estratégias inovadoras têm destacado o potencial do lodo como recurso valioso para diferentes aplicações, especialmente na agricultura, onde pode ser utilizado como biofertilizante (Gherghel *et al.*, 2019; Kacprzak *et al.*, 2017).

A literatura aponta que o reaproveitamento do lodo de esgoto contribui para a sustentabilidade ambiental ao reduzir a dependência de fertilizantes químicos, melhorar a estrutura do solo e incorporar nutrientes essenciais ao ciclo agrícola (Sena *et al.*, 2020). Estudos sobre a disposição de lodo sugerem que, quando tratado de forma adequada, ele pode ser uma solução eficiente para reduzir custos e promover uma economia circular, transformando uma destruição ambientalmente onerosa em um insumo produtivo (Zhou *et al.*, 2024).

Entretanto, a aplicação do lodo na agricultura não é isenta de desafios. Contaminantes

como metais pesados, patógenos e microplásticos podem estar presentes no local, representando riscos potenciais à saúde humana e ao meio ambiente se não forem devidamente monitorados e tratados (Gherghel *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2024). Isso destaca a importância de regulamentações rigorosas e de tecnologias avançadas para o tratamento do lodo. Em países que adotam uma abordagem sistemática e segura, como os da União Europeia, os benefícios do uso agrícola do lodo são extremamente reconhecidos, sendo essencial garantir altos padrões de controle e monitoramento (Kacprzak *et al.*, 2017).

Além disso, a gestão do lodo está intrinsecamente ligada às políticas públicas locais e à acessibilidade social. Estratégias eficazes para sua reutilização devem considerar não apenas os benefícios econômicos e ambientais, mas também a percepção pública sobre a segurança e o impacto do uso desses materiais. Estudos apontam que a resistência cultural e a desinformação podem dificultar a adoção do lodo como biofertilizante, mesmo em contextos onde uma tecnologia de tratamento garante sua segurança (Gherghel *et al.*, 2019).

Outro aspecto importante da reutilização do lodo está relacionado à mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Ao ser tratado e reaproveitado especificamente, o lodo pode contribuir para a redução de emissões provenientes de aterros sanitários e processos de descarte inadequado, promovendo um ciclo de carbono mais sustentável (Comineti; Schlindwein; Hoeckel, 2024). Isso reforça o papel do lodo no cumprimento das metas globais de sustentabilidade, incluindo a redução de emissões e a promoção de uma economia de baixo carbono (Sena *et al.*, 2020).

Por fim, a literatura destaca a importância da integração de políticas públicas, inovação tecnológica e engajamento social para o sucesso do reaproveitamento do lodo de esgoto. Embora os avanços no tratamento e na reutilização do lodo sejam promissores, é essencial que os sistemas de saneamento sejam fortalecidos e que as práticas de reaproveitamento sejam rompidas com base em critérios técnicos sólidos, garantindo benefícios sustentáveis e segurança para a sociedade e o meio ambiente.

METODOLOGIA

Este estudo utilizou um modelo econométrico de Diferenças em Diferenças (DiD) para investigar o impacto do uso de lodo de esgoto na agricultura sobre as despesas com saúde nos municípios brasileiros entre 1995 e 2021. Essa abordagem foi escolhida por sua capacidade de medir variações causais em diferentes cenários, permitindo a comparação entre municípios que utilizam lodo de esgoto e aqueles que não utilizam, antes e depois de eventos específicos, como a implementação da Instrução Normativa nº 61/2020 (Brasil, 2020). A metodologia segue

exemplos de estudos prévios, como Peixoto (2008), que demonstraram a eficácia do DiD na avaliação de políticas públicas.

As variáveis de tratamento foram definidas para os anos de 2017, com base na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2020), e 2020, com dados do Painel da Área de Fertilizantes, Inoculantes e Corretivos (SIPEAGRO) (Brasil, 2024a). Essas variáveis identificaram os municípios que declararam utilizar lodo de esgoto na agricultura, categorizando-os como usuários de lodo tratado ou não tratado.

Foram incluídas variáveis de controle para minimizar visões e capturar fatores estruturais que influenciam as despesas com saúde. Essas variáveis incluem população total (POP_TOT), Produto Interno Bruto (PIB), volume de água tratado, qualidade da água (Brasil, 2024b) e despesas próprias com saúde (DataSUS, Brasil, 2024d).

A análise foi feita separadamente para três categorias de municípios: pequenos, médios e grandes, conforme critérios populacionais. Essa segmentação buscou explorar possíveis heterogeneidades nos efeitos do uso de lodo, considerando as diferenças nas capacidades de gestão de saneamento e infraestrutura de saúde.

Para verificar a robustez dos resultados, foram realizadas análises adicionais, como testes de sensibilidade e modelos com especificações simplificadas. O DiD permitiu identificar os efeitos diferenciais do uso de lodo tratado e não tratado sobre as despesas com saúde, contribuindo para uma melhor compreensão do impacto dessa prática em diferentes contextos municipais.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em 2017, 215 municípios brasileiros declararam utilizar lodo de esgoto, tratado ou não, na agricultura. Desses, 45 admitiram não tratar o lodo antes do uso, enquanto 170 afirmaram realizar o tratamento (IBGE, 2020). A análise dos dados revela que os municípios que não tratavam o lodo (45 em 2017) podem enfrentar maiores desafios em relação às despesas com saúde. Isso pode estar associado à exposição a contaminantes presentes no lodo não tratado, que podem gerar externalidades negativas, como a disseminação de doenças relacionadas ao manejo inadequado de resíduos. Por outro lado, os 170 municípios que tratavam o lodo apresentam uma possibilidade de mitigação desses impactos, embora ainda sejam necessários investimentos em eficiência no tratamento.

No entanto, nenhum desses municípios estava registrado na base do SIPEAGRO, que em 2024 identificou apenas 54 municípios utilizando lodo de esgoto, (Brasil, 2024a), conforme as regras da Instrução Normativa nº 61/2020 (Brasil, 2020). A discrepância entre os 215

municípios que declararam utilizar lodo em 2017 e os 54 registrados no SIPEAGRO em 2020 sugere fragilidades no sistema de monitoramento e fiscalização da Instrução Normativa nº 61/2020. Essa discrepância pode ser atribuída tanto à ausência de fiscalização adequada quanto a barreiras logísticas ou financeiras enfrentadas pelos produtores para se registrarem no sistema. Tal lacuna reforça a necessidade de maior integração entre os níveis federal e municipal para garantir que as práticas de uso de lodo estejam devidamente documentadas e monitoradas.

Considerando o número total de municípios no Brasil, observa-se que a maioria não adota essa prática. A Tabela 1 apresenta estatísticas descritivas dos dados entre 1995 e 2021, destacando a grande variação nas características dos municípios brasileiros, especialmente em termos de população, PIB e despesas com saúde. Essa variação indica uma concentração de recursos e atividades econômicas em alguns municípios, enquanto outros permanecem com economias menores e menos desenvolvidas.

Tabela 01 - Estatísticas descritivas dados 1995-2021.

Variável	Mínimo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Máximo
População município	776	5,470	11,648	25,478	12,325,232
PIB	21,440	139,200	309,900	830,800	1,372,000,000
Esgoto tratado por esgoto coletado	0	0	0	1	5.313
Atendimento integral da qualidade da água tratada	0	0	0	1	1
Despesa com saúde	0.00E+00	7.76E+06	1.34E+07	2.71E+07	2.09E+10

Fonte: Própria.

As variáveis de tratamento e qualidade da água revelam desafios persistentes na infraestrutura de saneamento básico, e as despesas com saúde refletem tanto as necessidades locais quanto as capacidades fiscais dos municípios. O uso limitado de lodo tratado e não tratado sugere que há um grande potencial inexplorado para o aproveitamento desses recursos, desde que sejam superados os desafios técnicos, regulatórios e de aceitação pública.

A abordagem de análise de diferenças em diferenças (DiD), diferenciada para municípios pequenos, médios e grandes, é essencial para entender como as políticas ambientais e de saúde pública podem ser adaptadas para maximizar os benefícios e minimizar os impactos adversos em diferentes contextos municipais. As análises descritivas destacam disparidades significativas entre os municípios, justificando uma abordagem diferenciada na análise de DiD para municípios de diferentes portes. Essas informações são cruciais para a formulação de políticas públicas que visem reduzir as desigualdades regionais, melhorar a infraestrutura de saneamento e promover o uso sustentável de recursos em todo o Brasil.

Para analisar o impacto do uso de lodo de esgoto em municípios pequenos, a Tabela 2 apresenta os resultados do modelo de DiD. Nessa tabela, observa-se que o tratamento de lodo realizado em 2017 (treat_2017) está associado a um aumento significativo nas despesas com saúde. Esse resultado sugere que, apesar do tratamento, os municípios pequenos podem enfrentar desafios que resultam em maiores custos de saúde, o que pode estar associado às limitações na eficiência do tratamento ou à exposição a contaminantes remanescentes. A ausência de significância estatística em 2020 pode ser atribuída a dois fatores principais. Primeiramente, os avanços regulatórios após 2017 podem ter contribuído para práticas mais seguras no uso de lodo, reduzindo os impactos adversos. Em segundo lugar, a pandemia de COVID-19 provavelmente influenciou os dados de despesas com saúde, mascarando os efeitos associados ao uso de lodo de esgoto. Esses fatores reforçam a necessidade de análises mais detalhadas para diferenciar os impactos específicos do tratamento do lodo de eventos externos.

Tabela 02 - Resultados do Modelo DiD para Municípios Pequenos.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	Valor t	p-valor
treat_2017	2.355.616	480.705	4.900	< 0.001
treat_2020	1.162.982	1.238.137	0.939	0.348
POP_TOT	232.236	18.800	12.353	< 0.001
qd000i	43.887	43.735	1.003	0.316
PIB	8.621	0.701	12.303	< 0.001
m3TRAT	604.124	75.666	7.984	< 0.001

Fonte: Própria.

As variáveis de controle, como o PIB e a população total (POP_TOT), desempenham um papel significativo no aumento das despesas com saúde. Especificamente, municípios com maior PIB têm maior capacidade financeira para investir em saúde pública, o que pode refletir um esforço maior para melhorar os serviços oferecidos. Por outro lado, o crescimento populacional pressiona a infraestrutura existente, ampliando os custos. Uma análise percentual mostra que o impacto do crescimento econômico tende a ser maior em municípios médios e grandes, enquanto o crescimento populacional exerce maior pressão em municípios pequenos.

O volume de água tratada (m3TRAT) também está relacionado a um aumento significativo nas despesas de saúde (Tabela 2), o que sugere que, mesmo com melhorias no saneamento, os desafios de saúde pública permanecem nesses municípios. A relação positiva entre m3TRAT e despesas com saúde em municípios pequenos pode estar associada à exposição residual a contaminantes, mesmo após o tratamento. Em municípios médios (Tabela 3), no entanto, a redução das despesas sugere que o tratamento de água contribui para melhorar as condições de saúde pública. Esses resultados indicam que a eficiência no tratamento de água

desempenha um papel crucial na mitigação de riscos à saúde.

A Tabela 3 apresenta os resultados do modelo DiD para os municípios médios. O tratamento de lodo em 2017 (treat_2017) mostra um coeficiente positivo e marginalmente significativo, sugerindo um possível aumento nas despesas com saúde. Esse resultado pode indicar ineficiências no tratamento do lodo de esgoto antes de sua aplicação, refletindo a falta de eficácia das práticas adotadas. Por outro lado, o tratamento realizado em 2020 (treat_2020) não apresentou significância estatística, sugerindo que, assim como nos pequenos municípios, aqueles de médio porte que aplicam o esgoto de forma segura não enfrentam impactos negativos significativos relacionados ao uso do lodo de esgoto.

Tabela 03 - Resultados do Modelo DiD para Municípios Médios.

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	Valor t	p-valor
treat_2017	5.154.802	2.669.991	1.931	0.054
treat_2020	-2.147.886	3.188.223	-0.674	0.501
POP_TOT	452.478	44.291	10.216	< 0.001
qd000i	-128.204	374.280	-0.343	0.732
PIB	8.245	0.734	11.238	< 0.001
m3TRAT	-22.998	11.516	-1.997	0.046

Fonte: Própria.

Assim como nos municípios pequenos, a população (POP_TOT) e o PIB continuam a ter uma significância positiva nas despesas com saúde. Municípios com maior renda tendem a investir mais em saúde, o que se reflete em maiores despesas para expandir e manter os serviços de saúde pública. Além disso, é provável que esses municípios também invistam mais em saneamento, como indicado pelo volume de água tratada (m3TRAT), que foi associado a uma redução significativa nas despesas de saúde (Tabela 3). Este resultado sugere que melhorias na infraestrutura de saneamento podem ter um efeito positivo na saúde pública, prevenindo doenças e, assim, reduzindo os custos de saúde.

Por fim, a Tabela 4 apresenta os resultados para os municípios grandes. Neste grupo, tanto o tratamento de lodo em 2017 (treat_2017) quanto em 2020 (treat_2020) não mostraram significância estatística, sugerindo que os sistemas de saúde mais robustos desses municípios são capazes de absorver as variações no uso de lodo sem impactos significativos nas despesas de saúde. A ausência de significância estatística nos municípios grandes reflete a maior robustez dos sistemas de saúde e a menor dependência desses municípios do setor agrícola, onde o lodo é frequentemente aplicado. Além disso, a maior capacidade de absorção de impactos econômicos e ambientais permite que esses municípios neutralizem os efeitos adversos do uso do lodo, o que pode não ser possível em municípios menores.

Tabela 04 - Resultados do Modelo DiD para Municípios Grandes.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	Valor t	p-valor
treat_2017	110.202.500	78.946.740	1.396	0.164
treat_2020	48.922.100	67.051.930	0.730	0.466
POP_TOT	993.866	477.518	2.081	0.038
qd000i	-22.979.600	16.785.030	-1.369	0.172
PIB	11.599	0.717	16.178	< 0.001
m3TRAT	-4.816	13.149	-0.366	0.714

Fonte: Própria.

O aumento da população (POP_TOT) e do PIB, como esperado, está associado a um aumento nas despesas com saúde. A relação positiva entre PIB e despesas com saúde nesses municípios grandes indica que eles investem mais em saúde para acompanhar o crescimento econômico e a demanda por serviços de saúde. É provável que esses municípios também estejam investindo significativamente em saneamento, mas a robustez e a maturidade dos sistemas existentes podem explicar a falta de significância estatística do volume de água tratada (m3TRAT) sobre as despesas de saúde.

Para verificar a robustez dos resultados, foi ajustado um modelo de DiD simplificado, excluindo algumas variáveis de controle (POP_TOT e qd000i), mantendo apenas o PIB e o volume de água tratada (m3TRAT) como controles. A análise de robustez confirma a consistência dos resultados, mas a inclusão de possíveis outliers pode estar influenciando os coeficientes. Municípios com despesas de saúde excepcionalmente altas ou baixas, por exemplo, podem distorcer os efeitos médios observados. Uma análise adicional focada nesses casos extremos poderia ajudar a refinar as estimativas e garantir maior precisão nas conclusões.

A qualidade da água tratada (qd000i), embora seja uma variável relevante no contexto do saneamento básico, não apresentou significância estatística nos modelos. Isso pode indicar que, nos municípios analisados, outros fatores relacionados ao saneamento, como a eficiência do tratamento de esgoto e o uso adequado do lodo, têm maior peso na determinação das despesas com saúde. A ausência de impacto também pode estar associada à variabilidade das condições locais, como diferenças regionais na infraestrutura de saúde e saneamento.

A Tabela 5 apresenta os resultados dessa análise de robustez, mostrando que os coeficientes para treat_2017 e treat_2020 permanecem significativos. Isso indica que os impactos observados nas despesas com saúde devido ao tratamento do lodo de esgoto são robustos, mesmo com uma especificação de modelo mais simples. A permanência da significância desses coeficientes sugere que a influência do tratamento de lodo em 2017 e 2020 sobre as despesas com saúde não depende fortemente das variáveis de controle excluídas, reforçando a consistência dos resultados.

Tabela 05 - Resultados da Análise de Robustez.

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	Valor t	p-valor
Variável	Coefficiente	Erro Padrão	Valor t	p-valor
treat_2017	21.715.642	10.001.480	2.171	0.0299
treat_2020	51.254.229	24.830.120	2.064	0.0390
PIB	13.709	1.206	11.365	< 0.001
m3TRAT	-21.738	14.252	-1.525	0.127

Fonte: Própria.

Para avaliar a consistência dos resultados ao longo do tempo, foi realizada uma análise de sensibilidade restringindo a amostra aos anos posteriores a 2000. A Tabela 6 apresenta os resultados dessa análise, onde o coeficiente para treat_2017 permaneceu positivo e significativo, confirmando que os efeitos observados em 2017 são consistentes mesmo quando se considera apenas o período mais recente. Já o coeficiente para treat_2020 foi marginalmente significativo, o que pode refletir a influência de eventos externos, como a pandemia de COVID-19, sobre os resultados. Esses achados sugerem que, enquanto os impactos do tratamento de lodo em 2017 são estáveis, os efeitos em 2020 podem estar mais sujeitos a variações contextuais, especialmente devido às circunstâncias extraordinárias daquele ano.

Tabela 06 - Resultados da Análise de Sensibilidade (após 2000).

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	Valor t	p-valor
treat_2017	20.503.032	9.288.670	2.208	0.0273
treat_2020	40.129.425	22.946.600	1.749	0.0804
POP_TOT	1.145.509	449.619	2.548	0.0109
qd000i	-14.374	8.073	-1.780	0.0751
PIB	12.124	1.024	11.841	< 0.001
m3TRAT	-24.760	21.148	-1.171	0.242

Fonte: Própria.

Essas análises complementares, tanto de robustez quanto de sensibilidade, reforçam a confiabilidade dos resultados principais. A robustez dos impactos observados, mesmo em modelos simplificados, e a consistência dos efeitos ao longo do tempo, com algumas variações esperadas devido a fatores externos, sugerem que o uso de lodo de esgoto na agricultura pode ter implicações significativas para as despesas com saúde nos municípios brasileiros, principalmente quando não tratadas com segurança como prevê a Instrução Normativa nº 61/2020 (Brasil, 2020).

CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que o uso de lodo de esgoto na agricultura apresenta impactos variados nas despesas com saúde, influenciados pelo porte dos municípios, pela segurança do

tratamento aplicado e pelo perfil agrícola local. Municípios pequenos, com maior presença de atividades agrícolas, enfrentaram aumentos significativos nos gastos de saúde, evidenciando desafios na eficiência do tratamento e no controle de contaminantes. Nos municípios médios, o tratamento adequado foi associado à redução de custos, destacando a importância de práticas seguras para a promoção da sustentabilidade econômica e ambiental. Em grandes municípios, os impactos foram mínimos, devido à robustez dos sistemas de saúde e à baixa dependência da agricultura.

Apesar do potencial para reduzir a dependência de fertilizantes químicos e promover uma economia circular, alinhada aos ODS 6 e 12, o reaproveitamento de lodo de esgoto é um desafio que exige maior controle, fiscalização e integração entre registros, como os do SIPEAGRO e do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), para garantir segurança e eficiência. Além disso, é essencial fortalecer políticas públicas locais e capacitar gestores, especialmente em municípios menores. Pesquisas futuras podem explorar a aceitação social dessa prática e os avanços tecnológicos no tratamento de resíduos, ampliando as oportunidades para uma agricultura mais sustentável e segura.

REFERÊNCIAS

BRASIL (2024a). Ministério da Agricultura e Pecuária. **Painel da área de Fertilizantes, Inoculantes e Corretivos (SIPEAGRO)**. Acesso em: 27 de maio de 2024. Disponível em: <https://mapa-indicadores.agricultura.gov.br/publico/extensions/Fertilizantes/Fertilizantes.html>.

BRASIL. (2020a). **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico [...].

BRASIL. (2020b). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 61, de 08 de julho de 2020**. Estabelece as regras [...] e dos biofertilizantes destinados à agricultura.

BRASIL. (2020b). Secretaria especial de assuntos estratégicos. **Produção nacional de fertilizantes: estudo estratégico**. Acesso em: 12 jun. 24. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf.

BRASIL. (2024c). Ministério da Saúde. Datasus. **SIOPS - Sistema de Informações sobre Orçamentos Públicos em Saúde. Indicadores Municipais**. Acesso em: 15 jul. 24. Disponível em: <http://siops-asp.datasus.gov.br/CGI/defthtm.exe?SIOPS/serhist/municipio/mIndicadores.def>.

BRASIL. (2024d). Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **SNIS - Série Histórica**. Acesso em: 14 jun. 24. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>.

Comineti, C.S.S.; Schlindwein, M.M.; Hoeckel, P.H.O.; **Socio-environmental externalities of sewage waste management**. Science of the Total Environment. Volume 945, 1 de outubro de 2024, 174109. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.174109.

Gherghel, A., Teodosiu, C., & Gisi, S. D. (2019). **A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy**. Journal of Cleaner Production, pp. 244-263. Doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.240.

IBGE (2022). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da População**. Acesso em: 14 jun. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=28674>.

IBGE. (2020). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: 2017**. Acesso em: 14 jun. 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html?=&t=publicacoes>.

Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Singh, B. R. (2017). **Sewage sludge disposal strategies for sustainable development**. Environmental Research, pp. 39-46. Doi:10.1016/j.envres.2017.03.010.

ONU. 2024. NAÇÕES UNIDAS Brasil. **Objetivos do desenvolvimento sustentável**. Acesso em: 10 junho de 24. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.

Peixoto, Betânia Totino. **Avaliação Econômica do Programa fica Vivo: o caso piloto**. 1º Lugar - Qualidade do Gasto Público. Belo Horizonte/MG. Acesso em: 14 jun. 2024. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/jspui/bitstream/1/4669/1/tema-1-1o-lugar.pdf>.

Sena, M.; Seib, M.; Noguera, D.R.; Hicks, A. **Environmental impacts of phosphorus recovery through struvite precipitation in wastewater treatment**. Journal of Cleaner Production. 280. Doi:10.1016/j.jclepro.2020.124222.

Smith, K.; Liu, S. 2017. **Energy for Conventional Water Supply and Wastewater Treatment in Urban China: A Review**. Global Challenges. Soi:10.1002/gch2.201600016.

WHO/UNICEF. 2021. **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: Five years into the SDGs**. World Health Organization (WHO) and the United Nations Children's Fund (UNICEF), Geneva.

Zhou, P.; Li, D.; Zhang, C.; Ping, Q.; Wang, L.; Li, Y. 2024. **Comparison of different sewage sludge pretreatment technologies for improving sludge solubilization and anaerobic digestion efficiency: A comprehensive review**. Science of The Total Environment. 921. Doi:10.1016/j.scitotenv.2024.171175.

Submetido em: 23/12/2024

Aceito em: 9/01/2025

Publicado em: 28/07/2025

Avaliado pelo sistema *double blind review*