

Uso do lodo de esgoto em plantios florestais de espécies de *Eucalyptus* spp.

Use of sewage sludge in forest plantations of Eucalyptus spp.

Jessyca Sperotto¹
Maria Magdalena Ribas Doll²
Isabel Homczinski³

Resumo

O lodo de esgoto é um subproduto do tratamento de esgoto, e seu destino é a incineração ou armazenamento em aterros sanitários, mas pode ser usado na agricultura como fertilizante. Esta pesquisa objetivou avaliar a importância do uso do lodo de esgoto como fertilizante do solo em plantios florestais de espécies madeireiras. A metodologia que se mostrou mais adequada para o desenvolvimento deste estudo foi a pesquisa bibliográfica sistemática, realizada em artigos científicos publicados entre os anos de 2013 a 2023. O uso do lodo de esgoto em plantios florestais acelera e aumenta a produção de madeira e biomassa, além de trazer benefícios nutricionais. A sua utilização como fertilizante também traz benefícios ao meio ambiente, pois evita sua deposição em aterros sanitários ou a sua incineração e fornece retorno financeiro para a empresa que trata os efluentes e para empresa florestal, já que minimiza os gastos com fertilizantes convencionais.

Palavras-chave: madeira; biossólido; fertilização.

Abstract

Sewage sludge is a by-product of sewage treatment, and its destination is incineration or storage in landfills, but it can be used in agriculture as a fertilizer. This research aimed to evaluate the importance of using sewage sludge as soil fertilizer in forest plantations of timber species. The methodology that proved to be the most suitable for the development of this study was the systematic bibliographical research carried out in scientific articles published between the years 2013 to 2023. The use of sewage sludge in forest plantations accelerates and increases the production of wood and biomass, in addition to bring nutritional benefits. Its use as a fertilizer also brings benefits to the environment, as it avoids its deposition in landfills or its incineration, and provides financial return for the company that treats the effluents and for the forestry company, as it minimizes spending on conventional fertilizers.

Keywords: wood; biosolid; fertilization.

1 Mestranda em Ciências Florestais pela Universidade Estadual do Centro Oeste (UNICENTRO), Irati, PR, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7632-8166>. E-mail: jehsperotto@gmail.com

2 Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP), SP, Brasil. Professora em Engenharia e Gestão Ambiental Residência Técnica da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa, PR. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6648-1607>. E-mail: mmrdoll@uepg.br

3 Doutora em Ciências Florestais e bióloga pela UNICENTRO. Professora, Porto União, SC, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8178-2988>. E-mail: ihomczinski@gmail.com

Artigo recebido em 30.05.2023 e aceito em 19.09.2023.



1 Introdução

O lodo de esgoto pode ser definido como um subproduto comum do tratamento de efluentes (Abreu-Junior *et al.*, 2019). É o resíduo sólido insolúvel que permanece após o tratamento de esgoto, sendo chamado também de biossólido ou resíduo de esgoto doméstico (Pedroza *et al.*, 2019). Os lodos de esgoto ou biossólidos são resíduos orgânicos e ricos em nutrientes, levado às estações de tratamento de esgoto (ETE), por meio da rede coletora urbana, sendo que, após o processo de estabilização, torna-se um problema para as ETE (Lacerda *et al.*, 2021). A maior parte desses resíduos são incinerados ou armazenados em aterros sanitários, geralmente longe das estações de tratamento (Silva; Pinto, 2010).

Para resolver esse problema, o lodo de esgoto pode ser utilizado como fertilizante em plantios florestais, que se destinam apenas à produção de madeira e que não afetam a cadeia alimentar humana (Poggiani; Silva; Guedes, 2006). Essa estratégia visa melhorar a fertilidade do solo e manter as reservas de nutrientes nos ecossistemas, sendo uma opção ecologicamente e economicamente interessante (Silva *et al.*, 2008). Porém, é importante estudar o gerenciamento dos biossólidos, pois o transporte desses resíduos por longas distâncias, aumenta os custos de produção para a indústria (Silva; Pinto, 2010).

Nas últimas décadas, houve uma aceitação maior da aplicação do lodo de esgoto em florestas, graças à grande quantidade de pesquisas nessa área, o qual forneceu uma forte base teórica e prática para sua aplicação em ambiente agrícolas e florestais (Fytily; Zabaniotou, 2008).

As aplicações de lodo, em florestas plantadas de rápido crescimento, levam a um retorno dentro do ecossistema de nutrientes exportados na colheita. A liberação lenta de nutrientes, contidos no lodo, possibilita a reposição dos estoques de nutrientes do solo, ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantações florestais (Graciano *et al.*, 2008).

Apesar dessa importante utilização, na maioria das cidades brasileiras, o lodo de esgoto era despejado em aterros sanitários, embora seu uso em plantações florestais como fertilizante e condicionador de solo seja uma opção interessante. As aplicações de lodo de esgoto podem reduzir as quantidades de fertilizantes minerais necessários para sustentar a produtividade em solos inférteis (Silva; Poggiani; Laclau, 2011).

Dentre os plantios florestais com espécies exóticas, os plantios com as espécies do gênero *Eucalyptus* têm crescido nos últimos anos (Cardoso *et al.*, 2022).

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (2020), em 2019, houve um aumento de 2,4% de áreas plantadas no Brasil, sendo que dos 9,0 milhões de hectares de florestas plantadas, 6,9 milhões de hectares eram de plantações de eucalipto.

Segundo Cardoso *et al.* (2022), as espécies do gênero *Eucalyptus* são frequentemente plantados em solos de baixa fertilidade e requerem grandes quantidades de fertilizantes para produzir madeira economicamente viável. Os fertilizantes podem representar 50% dos custos de implementação, levando muitas empresas madeireiras a apoiar pesquisas destinadas a identificar fontes alternativas de nutrientes de baixo custo.

Com base nessas informações, a presente pesquisa objetivou avaliar a importância do uso de lodo de esgoto em plantios florestais de espécies de *Eucalyptus* spp.

1.1 Lodo de esgoto e sua utilização como fertilizante do solo

O lodo de esgoto, resultante do tratamento de resíduo líquido urbano, encaminhado para estações de tratamento pela rede de esgoto, é um resíduo rico em matéria orgânica (Singh; Agrawal, 2008).

Esse lodo corresponde a apenas 1% do volume de resíduos de esgoto, mas o tratamento e disposição final representam 20 a 40% dos custos operacionais de uma estação de tratamento (Singh; Agrawal, 2008). Dessa forma, esse resíduo deve ser aproveitado de forma benéfica, evitando a contaminação ambiental e trazendo benefícios do ponto de vista econômico (Abreu-Junior *et al.*, 2019).

O lodo de esgoto, utilizado como fertilizante do solo em plantios florestais, segundo Labrecque, Teodorescu e Daigle (1995) pode ser uma vantagem importante do uso agrícola para o setor florestal, porque muitas espécies têm potencial para bioacumular metais pesados na biomassa vegetal. Além disso, a maioria das espécies não é adequada para consumo humano ou animal (Silva *et al.*, 2015).

Nos últimos anos, houve um aumento na utilização de lodo de esgoto, como fertilizante em florestas e áreas degradadas (Gutiérrez-Ginés *et al.*, 2017). Sua aplicação em plantios florestais pode abordar duas questões centrais: i) reduz o risco de contaminantes que entram na cadeia alimentar humana (Kimberley *et al.*, 2004), uma vez que os produtos gerados não são comestíveis; e ii) aumenta o crescimento das árvores e a produtividade de todo o sistema (Abreu-Junior *et al.*, 2017).

Além disso, nas áreas tropicais, onde se concentram os países líderes de mercado mundial na produção de madeira (e derivados), o lodo de esgoto pode

melhorar significativamente a fertilidade do solo e as condições físico-químicas gerais do solo (Abreu-Junior *et al.*, 2005), sendo um resultado estratégico em áreas, muitas vezes caracterizadas por solos extremamente inférteis (Gutiérrez-Giné *et al.*, 2017).

Segundo Poggiani, Silva e Guedes (2006), o uso de dejetos humanos na agricultura para melhorar a fertilidade do solo teve início na China antiga, quando os orientais os utilizavam “naturalmente”, ou seja, praticamente sem nenhum tratamento. No Ocidente, o uso de esgoto sanitário, em áreas agrícolas, começou no século XIX, quando os britânicos começaram a enfrentar o problema da epidemia de cólera (Fytli; Zabaniotou, 2008). O uso científico do lodo de esgoto na agricultura começou no século XX, e pesquisas sobre seu uso são realizadas há muito tempo (Bispo; Almeida; Santos, 2019). Na década de 1970, esses estudos foram intensificados, ampliando o conhecimento científico sobre lodo e diferentes processos de tratamento (Poggiani; Silva; Guedes, 2006).

A reciclagem dos dejetos humanos em agroecossistemas tem uma tradição milenar tanto no Oriente quanto no Ocidente (Fytli; Zabaniotou, 2008). Países altamente desenvolvidos e industrializados destinam atualmente a maior parte dos resíduos do tratamento de esgoto para áreas agrícolas e florestais. Exemplos incluem França (58%), Itália (33%), Suíça (45%) e Noruega (58%) (Poggiani; Silva; Guedes, 2006).

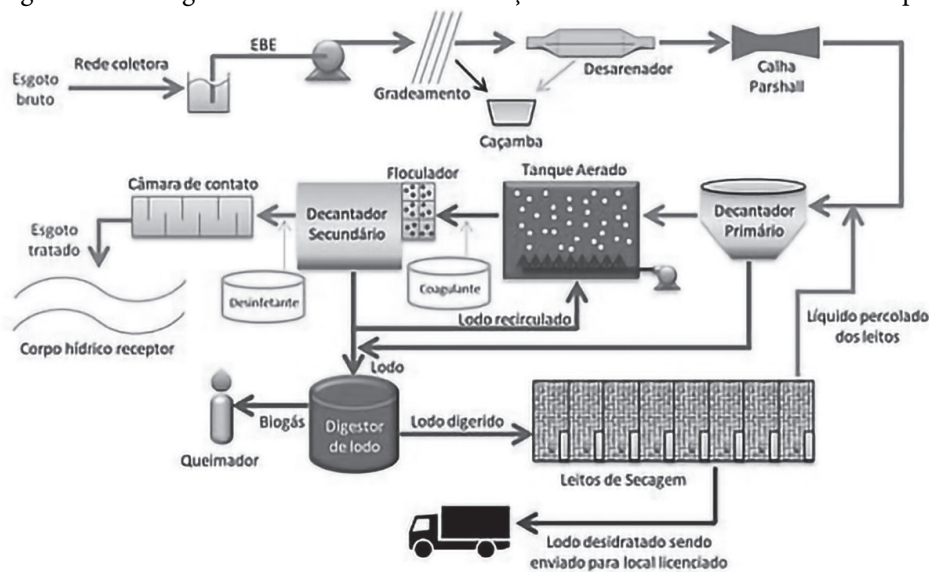
O uso na agricultura tem apresentado bons resultados, pois o efeito residual do lodo de esgoto é positivo na fertilidade do solo e conta com o aporte de diversos nutrientes que podem substituir a adubação

convencional (Silva *et al.*, 2015). Além de micronutrientes, esse material também contém altos teores de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo (Siqueira; Barroso; Marciano, 2017).

Porém, muitas vezes, o conteúdo elevado de metais em culturas agrícolas não é desejável, além de ser potencialmente perigoso. No entanto, para árvores isso é aceitável, desde que a atividade fisiológica não seja afetada. Assim, as plantações florestais podem ser usadas como filtros biológicos, através da captura, acúmulo e armazenamento de elementos poluentes dentro da biomassa, podendo contribuir para o processo de fitoremediação (Poggiani; Silva; Guedes, 2006) e reciclagem de nutrientes.

A aplicabilidade do lodo de esgoto em ecossistemas agroflorestais está diretamente relacionada às suas características físico-químicas e biológicas. De maneira geral, nas ETE, o esgoto que chega por meio dos coletores urbanos é submetido a um tratamento primário no qual, através de telas coletoras e de tanques de sedimentação, pode-se remover cerca de 60% dos sólidos maiores, mas apenas um terço dos componentes orgânicos relacionados à demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (Lacerda *et al.*, 2021). O tratamento secundário constitui-se no segundo estágio do tratamento das águas servidas. Nesse estágio, as bactérias decompõem os sólidos que permanecem após o tratamento primário (Silva; Pinto, 2010). Para tanto, nos tratamentos aeróbios, o oxigênio é soprado no efluente para suprir as bactérias que atuam no processo de decomposição de modo que a maior quantidade possível de sólidos possa ser dissolvida (Poggiani; Silva; Guedes, 2006) (figura 1).

Figura 1 – Fluxograma ilustrativo de uma estação de tratamento com todas as etapas



Fonte: Von Sperling (2014).

Após a desinfecção estabilizadora com álcalis, o lodo pode ser utilizado como substrato para mudas de árvores, para atender à crescente demanda por mudas nativas e exóticas e formar mudas de alta qualidade e baixo custo (Silva *et al.*, 2015). Segundo Jourdan *et al.* (2008), os riscos associados à aplicação de lodo em plantações florestais são menores do que na agricultura, uma vez que as plantações de eucaliptos tropicais geralmente são manejadas para produzir lenha, carvão vegetal, papelão ou celulose e papel, e o produto final (biomassa lenhosa) não é incorporado à alimentação humana.

Além disso, os impactos ambientais das aplicações de lodo de esgoto em plantações florestais são geralmente muito menores do que na agricultura, uma vez que as doses necessárias, para atender às necessidades de nutrientes das árvores, são baixas (Abreu-Junior *et al.*, 2020). As aplicações de lodo são necessárias apenas no primeiro ano da rotação de cultura do eucalipto que é de 6 a 7 anos, enquanto doses da mesma ordem de grandeza podem ser aplicadas anualmente para culturas agrícolas (Abreu-Junior *et al.*, 2017). As plantações florestais geralmente estão localizadas em solos arenosos pouco férteis, e um rápido desenvolvimento das raízes do eucalipto permite absorver os nutrientes liberados, durante a decomposição do lodo (Jourdan *et al.*, 2008).

Muitos aspectos da utilização do lodo florestal foram investigados no início da década de 1970, como: tecnologia aplicada, práticas de manejo e operacionais e monitoramento de impactos ambientais (Silva *et al.*, 2017). A aplicação de lodo de esgoto tratado, em quantidades ambientalmente aceitáveis, resultava em elevadas taxas de respostas de crescimento, tanto para plantios jovens, como para áreas já estabelecidas (Bertolazi *et al.*, 2016). A resposta do crescimento à aplicação do lodo de esgoto é tipicamente maior e mais duradoura, quando comparada com fertilização mineral (Poggiani; Silva; Guedes, 2006).

No exterior, várias cidades já utilizavam, rotineiramente, a aplicação de lodo de esgoto em ecossistemas agroflorestais como um efetivo método de disposição final (Kelessidis; Stasinakis, 2012). Um exemplo é a cidade de Bremerton, no Estado de Washington – Estados Unidos, que vem aplicando lodo de esgoto em florestas, desde o início da década de 1970, sendo que no ano de 1997, 100% do resíduo foi destinado às florestas do próprio município. Um fato, que incentivou o uso benéfico do lodo de esgoto, foi a redução de sua disposição em águas marítimas (Kelessidis; Stasinakis, 2012; Poggiani; Silva; Guedes, 2006).

No Brasil, a experimentação sobre o uso de lodo de esgoto na agricultura acontece desde a década de 1980 (Vieira *et al.*, 2011). Segundo Morais *et al.* (1997) Bettiolem, em 1982, foi o primeiro pesquisador

brasileiro a publicar sobre o uso de lodo de esgoto na agricultura. Em 1998, uma equipe de pesquisadores da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP) iniciou o primeiro estudo de campo do uso de lodo de esgoto (biossólidos) em cultivos florestais no Brasil (Poggiani; Benedetti, 1999). O estudo de Poggiani e Benedetti (1999) resume o programa de pesquisa do grupo e apresenta vários subprojetos desenvolvidos para verificar a viabilidade ecológica, florestal e econômica do uso de biossólidos no cultivo do eucalipto.

A aplicação de lodo de esgoto pode gerar uma economia para empresa, no que se refere a compra de fertilizantes na ordem de 64% da produção de mudas de eucalipto (Trigueiro; Guerrini, 2003). Segundo Kimberley *et al.* (2004), a aplicação de lodo de esgoto pode também melhorar significativamente o desempenho econômico das plantações florestais, devido ao aumento da produção de madeira.

Além disso, aumentos na produtividade primária líquida associados a um aumento na concentração de nutrientes nos componentes das árvores (folhas, galhos, madeira, casca e raízes) levam a mudanças benéficas no funcionamento do ecossistema, como resultado de uma maior transferência de nutrientes da biomassa florestal para a serapilheira e, posteriormente, ao solo (Vanderhoeven; Dassonville; Meerts, 2005).

O lodo de esgoto tem vantagens sobre a adubação mineral porque libera nutrientes lentamente no sistema radicular da árvore. Portanto, em culturas de ciclo longo, plantadas em solos arenosos e de baixa fertilidade, a liberação lenta de nutrientes pode otimizar sua absorção pelo sistema radicular e reduzir a lixiviação (Silva *et al.*, 2008).

2 Material e métodos

Para essa pesquisa, a metodologia que se mostrou mais adequada foi a pesquisa bibliográfica sistemática. Segundo Medeiros *et al.* (2015), a revisão sistemática pode ser definida como um tipo de pesquisa que utiliza a literatura sobre um tema específico como fonte de dados.

Esse tipo de investigação fornece um resumo das evidências relevantes para uma determinada estratégia de intervenção, por meio da aplicação de métodos de busca explícita e sistemática, avaliação crítica e síntese das informações selecionadas. Pode apresentar cinco passos: 1. definir a pergunta (o que se deseja pesquisar); 2. buscar a evidência (pesquisa por trabalhos em base de dados, por meio de palavras-chave); 3. revisar e selecionar os estudos (critérios de inclusão e exclusão); 4. analisar a qualidade metodológica dos estudos (análise dos artigos para verificação da relevância dos resultados); 5. apresentar os resultados.

A pergunta que permeia este estudo é: as pesquisas científicas dos últimos 10 anos que avaliam o uso do lodo de esgoto como fertilizante nos plantios de *Eucalyptus* spp. confirmam sua eficácia? A busca por evidências foi realizada na plataforma Portal de Periódicos da CAPES na base de dados *Scopus*. As palavras-chaves utilizadas foram: “lodo de esgoto”, “adubo”, “*Eucalyptus*” e “plantios florestais”.

A busca foi realizada quatro vezes, sendo que, na primeira busca, usou essas quatro palavras, tendo um resultado de três artigos. Na segunda vez, utilizou-se essas mesmas palavras, porém traduzidas para o inglês, sendo elas: “*sewage sludge*”, “*fertilizer*”, “*Eucalyptus*” e “*forest plantations*”. Nessa busca, o resultado foi de 20 artigos.

Na terceira busca, utilizaram-se essas mesmas palavras, traduzidas para o inglês com exceção da palavra “*fertilizer*”, obtendo um resultado de 38 artigos. E, por fim, na quarta busca utilizou-se apenas as palavras-chave “lodo de esgoto” e “*Eucalyptus*”, tendo um resultado de 64 artigos.

Com as quatro buscas, obteve-se resultado de 125 artigos. Desses 125 artigos, 57 eram duplicatas, 35 artigos foram publicados antes de 2013, e 01 artigo não era publicado em periódicos. Após essa filtragem, restaram 32 artigos.

Após a seleção dos estudos, foi realizada a análise da qualidade metodológica das pesquisas, com a leitura dos resumos, para verificar se esses 32 artigos traziam resultados pertinentes para responder o questionamento da presente pesquisa. Os critérios de inclusão nessa etapa foram artigos científicos que tivessem avaliado a eficácia do lodo de esgoto como fertilizante em plantios florestais de *Eucalyptus* spp. Nessa etapa da análise, 24 artigos foram descartados, sendo que 7 artigos eram

voltados à produção de mudas de *Eucalyptus* em viveiro, 04 não eram voltados para espécie de *Eucalyptus*, 04 artigos abordavam outras espécies além do *Eucalyptus*, 03 eram artigos de revisão, 02 artigos eram focados em recuperação de áreas degradadas com espécies de *Eucalyptus*, 02 artigos não eram sobre lodo de esgoto, e 02 artigos não tinham como foco a eficácia do lodo em plantios de *Eucalyptus*.

Dessa forma, foram analisados 08 artigos e os resultados das pesquisas são apresentados no próximo capítulo. Inicialmente, foi realizada uma avaliação bibliométrica dos artigos selecionados com o intuito de apresentar informações sobre as revistas, em que esses artigos foram publicados, bem como: o fator de impacto dos periódicos, o número de citações dos estudos e a nuvem de palavras-chaves mais citadas nas pesquisas.

Segundo Medeiros *et al.* (2015), a bibliometria é um campo de estudo que utiliza métodos matemáticos e estatísticos para investigar e quantificar os processos de comunicação escrita. Como tal, pode ser definido como o estudo dos aspectos quantitativos da produção científica, divulgação e uso da informação publicada e sua validade. A análise bibliométrica foi realizada no *software* R (R Core Team, 2022), utilizando a interface do pacote “*bibliometrix*” (Aria; Cuccurullo, 2017).

3 Resultados e discussão

3.1 Resultados bibliométricos dos artigos selecionados

As palavras-chave mais frequentes no texto foram: “*plantations*”, “*sludge*”, “*Eucalyptus*”, “*fertilizers*”, “*organic fertilizer*” e “*soil fertility*” (figura 2), indicando a relevância dessas palavras para pesquisas futuras sobre a aplicação do lodo de esgoto em plantios florestais de espécies de *Eucalyptus*.

Figura 2 – Nuvem de palavras-chaves mais frequentes encontradas nos artigos utilizados nesta análise



Fonte: Os autores (2023).

Os artigos selecionados para esta pesquisa estão dispostos na tabela 1. Em relação a informações bibliométricas, 88% foram publicados em periódicos internacionais, como alto fator de impacto e *Qualis* acima de B1. Os artigos publicados de 2014 a 2020 foram utilizados como citação em outros artigos

científicos, variando entre 12 e 41 citações. Apenas os artigos recentes de 2021 a 2022 não apresentaram citações em outras pesquisas, por serem muito recentes. Isso indica que as pesquisas selecionadas possuem resultados robustos e confiáveis para responder ao questionamento da presente pesquisa.

Tabela 1 – Informações bibliométricas referentes aos artigos selecionados para análise sistemática

Autor	Ano	Título	Citações ¹	Língua	Revista	FI	Qualis ²
Abreu-Junior <i>et al.</i>	2019	<i>Effects of sewage sludge application on unfertile tropical soils evaluated by multiple approaches: A field experiment in a commercial Eucalyptus plantation</i>	30	Inglês	<i>Science of the Total Environment</i>	10.754	A1
Abreu-Junior <i>et al.</i>	2017	<i>Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increased wood production in Eucalyptus plantations</i>	41	Inglês	<i>Journal of Environmental Management</i>	6.789	A1
Abreu-Junior <i>et al.</i>	2020	<i>Sewage sludge Application in Eucalyptus urograndis Plantation: Availability of Phosphorus in Soil and Wood Production</i>	9	Inglês	<i>Frontiers in Environmental Science</i>	5.411	A2
Cardoso <i>et al.</i>	2021	<i>Heavy metal and fertility in a Tropical Oxisol amended with sewage sludge under Eucalyptus plantation</i>	0	Inglês	<i>Materials Science and Engineering</i>	8.457	B2
Cardoso <i>et al.</i>	2022	<i>Fertilization management with sewage sludge sustains Eucalyptus productivity in Cerrado infertile soil</i>	0	Inglês	<i>Forest Ecology and Management</i>	4.384	A1
Ferraz; Momentel and Poggiani	2016	<i>Soil fertility, growth and mineral nutrition in Eucalyptus grandis plantation fertilized with different kinds of sewage sludge</i>	17	Inglês	<i>New Forests</i>	2.697	A2
Ferraz and Poggiani	2014	<i>Biomassa, nutrientes e metais pesados em raízes de eucaliptos adubados com diferentes lodos de esgoto</i>	12	Português	CERNE	1.010	B1
Florentino <i>et al.</i>	2019	<i>Long-term effects of residual sewage sludge application in tropical soils under Eucalyptus plantations</i>	31	Inglês	<i>Journal of Cleaner Production</i>	11.072	A1

¹Número de citações do artigo, conforme informações obtidas no Google Acadêmico;

²Qualis da revista, conforme informações obtidas na plataforma Sucupira; FI: Fator de Impacto da Revista.

Fonte: Os autores (2023).

3.2 Eficácia do uso do lodo de esgoto em plantios florestais de *Eucalyptus* spp

Uma das grandes preocupações quanto ao uso do lodo de esgoto é em relação a sua toxicidade. Dessa forma, alguns trabalhos analisaram a toxicidade do lodo de esgoto a curto e a longo prazo. Abreu-Junior *et al.* (2019), avaliando a toxicidade do lodo de esgoto em plantios de *Eucalyptus*, verificaram os teores dos elementos potencialmente tóxicos (EPT) (Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn todos em mg kg⁻¹). Os autores verificaram que os EPT nos solos tendem a subir com o aumento das doses do lodo de esgoto, sendo testado as seguintes concentrações: 100, 95, 90, 85, 80 e 75%. Porém, em todos os tratamentos investigados, as concentrações do EPT foram consistentemente abaixo das concentrações naturais do solo e dos valores de referência de qualidade, ou seja, Resolução CONAMA N° 375/2006 (Brasil, 2006). Os bioensaios também mostraram uma baixa eco e genotoxicidade generalizada do lodo de esgoto com o aumento das doses de lodo, mas com uma clara tendência decrescente com o passar do tempo, sendo analisados cinco períodos de tempos (18, 21, 24, 27 e 34 meses).

Florentino *et al.* (2019) também avaliaram a toxicidade do lodo de esgoto em plantios de eucalipto, porém a avaliação foi dos efeitos a longo prazo, tanto em termos das principais características químicas (pH, matéria orgânica do solo, N, P, S, K, Ca, Mg e capacidade de troca catiônica) quanto dos elementos potencialmente tóxicos (As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Se e Zn) no solo. Os efeitos residuais foram avaliados em quatro áreas no estado de São Paulo, após 10,0, 12,2, 12,4 e 17,2 anos da primeira e única aplicação, respectivamente. Os autores verificaram que os teores de matéria orgânica do solo, macronutrientes principais (N e P) e capacidade de troca catiônica foram geralmente maiores em solos tratados com lodo de esgoto, enquanto os teores de elementos potencialmente tóxicos aumentaram com o aumento das dosagens. Na maioria dos tratamentos investigados, as concentrações de elementos potencialmente tóxicos ficaram abaixo das concentrações naturais do solo e dos valores de referência de qualidade. Os efeitos da aplicação de lodo residual de esgoto no solo, tanto os prós quanto os contras, podem ser detectados mesmo muitos anos após a primeira e única aplicação.

Com isso, verifica-se que, apesar da toxicidade aumentar com o aumento da dosagem do lodo de esgoto, esses valores não ultrapassam as recomendações determinadas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução N° 375/2006 (Brasil, 2006).

O uso do lodo de esgoto também pode reduzir o uso de nitrogênio (N) e fósforo (P) em plantações florestais. Abreu-Junior *et al.* (2017) avaliaram os benefícios da aplicação de diferentes quantidades de lodo de esgoto (0, 8, 15 e 23 Mg ha⁻¹, base seca) com dosagens diferentes de N (0, 47, 95 e 142 kg ha⁻¹) e P (0, 28, 56 e 84 kg ha⁻¹ de P₂O₅) em plantações de eucalipto de solos tropicais inférteis aos 8 a 44 meses, após o plantio. Os autores verificaram que em todos os tratamentos com lodo de esgoto, com ou sem N e P, houve um crescimento maior do volume de madeira, se comparado aos tratamentos com apenas a aplicação de fertilizantes N e P. A aplicação de lodo de esgoto sobre 100% do N (142 kg ha⁻¹), suplementado com 66% (56 kg ha⁻¹) do P, aumentou em 7% a produção do volume de madeira de *E. grandis* com 44 meses (178 m³ ha⁻¹), em comparação com adubação mineral NPK (166 m³ ha⁻¹). O tempo de cultivo para produzir 150 m³ ha⁻¹ de volume de madeira foi reduzido em cinco meses com a aplicação de lodo mais 2/3 de P (56 kg ha⁻¹). Dessa forma, o lodo de esgoto pode representar uma excelente fonte de fertilizante não convencional de N e P para a produção de madeira em solos tropicais inférteis e reduzir o custo da compra de fertilizantes convencionais.

Esses resultados também foram observados por Abreu-Junior *et al.* (2020), ao avaliarem a disponibilidade de P no solo e seu efeito na produção de madeira em plantio de *Eucalyptus urograndis* com 22 meses de idade, tratado com lodo de esgoto. Os autores constataram que 29 mg/ha⁻¹ de lodo de esgoto + 17,5 kg ha⁻¹ de P resultaram em maiores ganhos de volume e biomassa de madeira se comparados à fertilização com NPK em plantios para alto rendimento de madeira. A aplicação de lodo de esgoto na dose recomendada pelos autores, suplementada com 66% da dose recomendada de P adubo em plantações de eucalipto, pode reduzir o uso de fertilizantes fosfatados em 33% e fertilizantes nitrogenados em 100% e manter a disponibilidade comparável de P no solo e a produção de madeira.

A aplicação do lodo de esgoto com P também foi avaliado por Cardoso *et al.* (2021) em plantios de eucalipto aos 36 meses de idade. Os autores constataram que a aplicação de lodo de esgoto com P aumentou a matéria orgânica do solo e as concentrações de metais pesados que estavam principalmente ligados às frações de matéria orgânica e óxido. O lodo de esgoto forneceu ao eucalipto produção, concentração e acúmulo de metais pesados no tronco, galhos e folhas, muito semelhantes à adubação mineral para

alta produção de madeira. A aplicação do lodo de esgoto suprido com P aumentou a produção de metais pesados, fertilidade do solo, sem risco de contaminação ambiental.

Além do P e do N, o lodo de esgoto pode também aumentar a quantidade de boro (B) e mitigar o impacto da seca no crescimento do eucalipto. Cardoso *et al.* (2022) avaliaram o crescimento e a produção de madeira de *Eucalyptus urograndis* com 54 meses de idade, na região do Cerrado do Brasil, com a aplicação de lodo de esgoto suplementada com P e B. Os autores verificaram que a aplicação de lodo de esgoto, baseada na exigência de N das árvores, suplementada com P, resultou em produção de madeira semelhante à produzida sob adubação mineral de alta produtividade. Houve menor crescimento acumulado na área de seção transversal do tronco (ASTT) no inverno frio e seco, em comparação com o verão quente e chuvoso. No entanto, a aplicação de lodo de esgoto suplementada com B promoveu o crescimento do ASTT, aumentando a tolerância do eucalipto aos períodos de estiagem. Dessa forma, o uso do lodo de esgoto suplementado com P e B melhorou o crescimento do tronco, durante os períodos de seca, bem como a produção de volume de madeira.

Ferraz, Momentel e Poggiani (2016), ao avaliar a fertilidade do solo, nutrição mineral e crescimento arbóreo de plantios de *Eucalyptus grandis* adubados com três tipos de lodo de esgoto, verificaram que a aplicação de lodo de esgoto aumentou os teores de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo na camada de 0 a 5 cm de profundidade do solo, bem como os teores de nitrogênio, fósforo, cobre e zinco nas folhas do eucalipto. A aplicação do lodo (condicionado com cal virgem) também aumentou o pH e a concentração de cálcio no solo, em comparação com outros tipos de lodo (condicionado com polieletrólito), resultou em maiores relações cálcio e magnésio (Ca:Mg) e cálcio e potássio (Ca:K) nas folhas. A adubação com lodo de esgoto proporcionou um aumento de 50 a 90 % no volume de madeira em relação ao tratamento sem adubação.

A aplicação de lodo de esgoto em plantios de *Eucalyptus* spp. também pode favorecer o desenvolvimento das raízes. Ferraz e Poggiani (2014), ao avaliar a biomassa seca, a concentração de nutrientes e metais pesados em raízes finas ($\varnothing < 5$ mm), na camada de 0-20 cm da superfície do solo de árvores de *Eucalyptus grandis*, aos 42 meses de idade, adubadas com lodos de diferentes estações de tratamento de esgotos (ETE), verificaram que a biomassa de raízes

finas foi similar entre os tratamentos com lodo de esgoto e a testemunha. Mas a adubação com o lodo condicionado com cal, propiciou maior biomassa de raízes, em relação à fertilização mineral. De maneira geral, a adubação com os lodos de diferentes ETE elevou a concentração de fósforo (P), cálcio (Ca), zinco (Zn) e níquel (Ni) nas raízes finas e reduziu a concentração de magnésio (Mn), mas não alterou significativamente a concentração dos metais cádmio (Cd), crômio (Cr) e chumbo (Pb).

4 Considerações finais

Com a presente pesquisa, foi possível enfatizar a importância do uso do lodo de esgoto como fertilizante em plantios florestais já estabelecidos. Além de trazer benefícios para o meio ambiente, pois evita sua deposição em aterros sanitários, traz benefícios para o crescimento e desenvolvimento de espécies florestais e retorno financeiro, tanto para empresa que faz o tratamento de efluentes, quanto para a empresa florestal, pois plantios tratados com lodo de esgoto não necessitam de fertilizantes minerais e apresentam um crescimento mais rápido em volume e biomassa, se comparada a plantios sem a sua aplicação, além de favorecer o crescimento das raízes.

Apesar da sua importância, muitas pesquisas ainda precisam ser realizadas no Brasil, bem como a divulgação desse produto para as empresas, para que o lodo de esgoto seja utilizado como fertilizante do solo em plantios florestais e não seja mais destinado em aterros sanitários ou incinerados. Em outros países, essa prática é comum e bem antiga, porém no Brasil sua utilização tem pouco mais de 40 anos, tendo um longo caminho de estudo ainda a ser percorrido.

Referências

- ABREU-JUNIOR, C. H. *et al.* Effects of sewage sludge application on unfertile tropical soils evaluated by multiple approaches: a field experiment in a commercial Eucalyptus plantation. **The Science of the Total Environment**, v. 655, p. 1457-1467, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.334.
- ABREU-JUNIOR, C. H. *et al.* Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increased wood production in Eucalyptus plantations. **Journal of Environmental Management**, v. 203, n. Pt 1, p. 51-58, 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.07.074.
- ABREU-JUNIOR, C. H. *et al.* Sewage sludge application in Eucalyptus urograndis plantation: availability of phosphorus in soil and wood

- production. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, 2020. DOI: 10.3389/fenvs.2020.00116.
- ABREU-JUNIOR, C. H. *et al.* Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 4, p. 391-470, 2005.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 956-975, 2017. DOI: 10.1016/j.joi.2017.08.007.
- BERTOLAZI, K. B. *et al.* Viabilidade da aplicação de composto de lodo de esgoto no cultivo inicial de eucalipto. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 4, n. 1, p. 72-78, 2016. DOI: 10.4322/2359-6643.04110.
- BISPO, I. A.; ALMEIDA, S. S.; SANTOS, S. S. A. *In*: ANDRADE, D. F. (org.). **Engenharia no século XXI**. Belo Horizonte: Poisson, 2019. p. 54-65. v. 12. DOI: 10.36229/978-85-7042-199-9.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução No 375, de 29 de agosto de 2006**. 2006. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-3752--006_103464.html. Acesso em: 24 mar. 2023.
- CARDOSO, P. H. S. *et al.* Fertilization management with sewage sludge sustains Eucalyptus productivity in Cerrado infertile soil. **Forest Ecology and Management**, v. 519, p. 120338, 2022. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120338.
- CARDOSO, P. H. S. *et al.* Heavy metal and fertility in a Tropical Oxisol amended with sewage sludge under Eucalyptus plantation. **Materials Science and Engineering**, v. 1196, n. 1, p. 12027, 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1196/1/012027.
- FERRAZ, A. V.; MOMENTEL, L. T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth and mineral nutrition in Eucalyptus grandis plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, v. 47, n. 6, p. 861-876, 2016. DOI: 10.1007/s11056-016-9549-1.
- FERRAZ, A. V.; POGGIANI, F. Biomassa, nutrientes e metais pesados em raízes de eucaliptos adubados com diferentes lodos de esgoto. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 311-320, 2014. DOI: 10.1590/01047760.201420021491.
- FLORENTINO, A. L. *et al.* Long-term effects of residual sewage sludge application in tropical soils under Eucalyptus plantations. **Journal of Cleaner Production**, v. 220, p. 177-187, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.065.
- FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 1, p. 116-140, 2008. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.014.
- GRACIANO, C. *et al.* Fertilization in a fourth rotation Eucalyptus grandis plantation with minimal management. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 26, n. 2, p. 155-169, 2008. DOI: 10.1080/10549810701879693.
- GUTIÉRREZ-GINÉS, M. J. *et al.* Potential use of biosolids to reforest degraded areas with New Zealand native vegetation. **Journal of Environmental Quality**, v. 46, n. 4, p. 906-914, 2017. DOI: 10.2134/jeq2017.04.0139.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual 2020**. São Paulo: [s. n.], 2020.
- JOURDAN, C. *et al.* Fine root production and turnover in Brazilian Eucalyptus plantations under contrasting nitrogen fertilization regimes. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 3, p. 396-404, 2008. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.04.034.
- KELESSIDIS, A.; STASINAKIS, A. S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. **Waste Management**, v. 32, n. 6, p. 1186-1195, 2012. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.01.012.
- KIMBERLEY, M. O. *et al.* Economic analysis of growth response from a pine plantation forest applied with biosolids. **Forest Ecology and Management**, v. 189, n. 1-3, p. 345-351, 2004. DOI: 10.1016/j.foreco.2003.09.003.
- LABRECQUE, M.; TEODORESCU, T. I.; DAIGLE, S. Effect of wastewater sludge on growth and heavy metal bioaccumulation of two Salix species. **Plant and Soil**, v. 171, n. 2, p. 303-316, 1995. DOI: 10.1007/BF00010286.
- LACERDA, S. M. P. *et al.* Lodo de esgoto da ete como fonte de nitrogênio na cultura da margarida (leucanthemum maximum). **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 12, p. 121518-121529, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n12-765.
- MEDEIROS, I. L. *et al.* Revisão sistemática e bibliometria facilitadas por um Canvas para

- visualização de informação. **InfoDesign**, v. 12, n. 1, p. 93-110, 2015. DOI: <https://doi.org/10.51358/id.v12i1.341>.
- MORAIS, S. J. *et al.* Uso do lodo de esgoto da Corsan-Santa Maria (RS), comparado com outros substratos orgânicos. **Sanare**, v. 6, n. 6, p. 44-49, 1997.
- PEDROZA, M. M. *et al.* Lodo de esgoto doméstico: características físicas, químicas e biológicas. **Multidebates**, v. 3, n. 2, p. 206-218, 2019.
- POGGIANI, F.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade do lodo de esgoto urbano em plantações de eucalipto. **Silvicultura**, v. 80, 1999.
- POGGIANI, F.; SILVA, P.; GUEDES, M. Uso do lodo de esgoto em plantações florestais. *In*: ANDREOLI, C. V. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006.
- R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. 2022. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2022.
- SILVA, B. V. N.; PINTO, L. V. A. Potencial do uso do lodo de esgoto como adubo orgânico em cobertura de espécies florestais nativas plantadas em área degradada por pastagem. **Revista Agrogeoambiental**, v. 2, n. 1, 2010. DOI: [10.18406/2316-1817v2n12010251](https://doi.org/10.18406/2316-1817v2n12010251). Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/251>. Acesso em: 22 mar. 2023.
- SILVA, F. A. M. *et al.* Produção de mudas de Juçara com resíduos agroindustriais e lodo de esgoto compostados. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 9, n. 2, p. 109-121, 2015. DOI: [10.18011/bioeng2015v9n2p109-121](https://doi.org/10.18011/bioeng2015v9n2p109-121).
- SILVA, M. I. *et al.* Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings. **Ciência Rural**, v. 47, n. 1, 2017. DOI: [10.1590/0103-8478cr20160064](https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160064).
- SILVA, P. H. M. *et al.* Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com lodos de esgoto úmido e seco. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 845-854, 2008. DOI: [10.1590/S0100-67622008000500009](https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000500009).
- SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; LACLAU, J. P. Applying sewage sludge to *Eucalyptus grandis* plantations: effects on biomass production and nutrient cycling through Litterfall. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2011, p. 1-11, 2011. DOI: [10.1155/2011/710614](https://doi.org/10.1155/2011/710614).
- SINGH, R. P.; AGRAWAL, M. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. **Waste Management**, v. 28, n. 2, p. 347-358, 2008. DOI: [10.1016/j.wasman.2006.12.010](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010).
- SIQUEIRA, D. P.; BARROSO, D. G.; MARCIANO, C. R. Lodo de esgoto: diretrizes e o seu uso como fertilizante, condicionador de solo e substrato florestal. **Revista Vértices**, v. 19, n. 3, p. 171-186, 2017. DOI: [10.19180/1809-2667.v19n32017p171-186](https://doi.org/10.19180/1809-2667.v19n32017p171-186).
- TRIGUEIRO, R. M. GUERRINI, I. A. Uso de biossólido como substrate para produção de mudas de eucalipto. **Scientia Forestalis**, n. 64, p. 150, 1 dez. 2003.
- VANDERHOEVEN, S.; DASSONVILLE, N.; MEERTS, P. Increased Topsoil Mineral Nutrient Concentrations Under exotic invasive plants in Belgium. **Plant and Soil**, v. 275, n. 1-2, p. 169-179, 2005. DOI: [10.1007/s11104-005-1257-0](https://doi.org/10.1007/s11104-005-1257-0).
- VIEIRA, G. G. *et al.* O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto: uma revisão. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 81-96, 2011. DOI: [10.31514/rliberato.2011v12n17.p81](https://doi.org/10.31514/rliberato.2011v12n17.p81).
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 4. ed. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2014.