

Trabalho de Formatura  
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**IMPLICAÇÕES DA DISPOSIÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO  
DE ESGOTO EM SOLO NO BRASIL**

Thaís Alveno Vieira

Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro (SP)

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

THAÍS ALVENO VIEIRA

**IMPLICAÇÕES DA DISPOSIÇÃO DE LODO DE  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM  
SOLO NO BRASIL**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Comissão do Trabalho de Formatura do Curso  
de Graduação em Engenharia Ambiental do  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas –  
Unesp, Campus de Rio Claro (SP), como parte  
das exigências para o cumprimento da disciplina  
Trabalho de Formatura no ano letivo de 2015.*

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro – SP

2015

628.2    Vieira, Thaís Alveno  
V658i    Implicações da disposição de lodo de estação de  
          tratamento de esgoto em solo no Brasil / Thaís Alveno Vieira.  
- Rio Claro, 2015  
          44 f. : il., gráfs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) -  
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas

Orientador: Marcelo Loureiro Garcia

1. Esgotos. 2. Lodo de esgoto. 3. Resíduos sólidos. 4.  
Solos. I. Título.

THAÍS ALVENO VIEIRA

IMPLICAÇÕES DA DISPOSIÇÃO DE LODO DE ESTAÇÃO  
DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM SOLO NO BRASIL

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Profa. Dra. Clauciana Schmidt Bueno de Moraes

Pesquisadora Lauren Nozomi Marques Yabuki

Rio Claro, 20 de agosto de 2015.

Thaís Alveno Vieira

Marcelo Loureiro Garcia

## RESUMO

A gestão de resíduos sólidos originários do tratamento de esgotos domésticos e industriais em estações de tratamento de efluentes é um desafio presente na realidade brasileira. Porém, o planejamento e a destinação final do lodo acabam sendo negligenciados, acarretando sérios danos à saúde humana e ao meio ambiente. O uso agrícola do lodo encontra-se em crescimento no Brasil e é regulamentado pela Resolução CONAMA N° 375/2006, que estabelece os critérios e parâmetros para que o lodo possa ser disposto em solo com segurança ao meio ambiente e à população. O presente estudo objetiva definir os efeitos do uso de lodo de esgoto em solo de acordo com os resultados do levantamento bibliográfico feito de trabalhos teóricos e práticos que utilizaram este resíduo na recuperação ou condicionamento de solos para a agricultura ou recuperação de áreas degradadas, de modo a verificar se esse tipo de reciclagem do lodo é ambiental e socialmente viável e segura. Pode-se dizer que o reuso do lodo de esgoto com a disposição em solos atende aos requisitos da busca por uma alternativa que traga vantagens agronômicas, ambientais e econômicas, além de ser uma alternativa ambiental e socialmente saudável se devidamente atendidas as legislações que tratam do tema, porém estas devem ser revistas e atualizadas levando em consideração as condições edafo-climáticas brasileiras, justificando-se, assim, a necessidade de mais estudos na área.

**Palavras-chave:** Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto, Destinação final de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto, Disposição de lodo de Estação Tratamento de Esgoto em solo.

## ABSTRACT

The management of solid waste originated from the treatment of domestic and industrial sewage in wastewater treatment plants is a current challenge in the Brazilian reality. However, the planning and the final destination of sludge end up being overlooked, causing serious damage to human health and the environment. The use of sewage sludge in the agriculture is growing in Brazil and is regulated by the Resolução CONAMA N° 375/2006 which establishes the criteria and parameters so that the sludge can be disposed on the ground safely to the environment and the population. This study aims to define the effects of using sewage sludge in soil according to the results of the bibliographic survey of theoretical and practical studies using this waste in the recovery and conditioning of soil for agriculture and recuperation of degraded areas, and to define whether such type of sludge recycling is environmentally and socially feasible and safe. It can be said that the reuse of sewage sludge in soil meets the search requirements for an alternative that brings agronomic, environmental and economic benefits, as well as being an environmental and social healthy alternative if properly attended the laws that deal with the subject, anyway those should be reviewed and updated taking into account Brazilian soil and climate conditions, thus justifying need for more studies in the area.

**Key words:** Sewage treatment plant sludge, final disposal of sewage treatment plant sludge, Sewage treatment plant sludge disposal in soils.

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CTC - Capacidade de troca catiônica

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>08</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>11</b>
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>12</b>
<b>4.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
<b>4.1.</b>	<b>Alternativas para a disposição final do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto .....</b>	<b>13</b>
<b>4.2.</b>	<b>Uso agrícola .....</b>	<b>16</b>
<i>4.2.1.</i>	<i>Benefícios do uso agrícola do lodo de esgoto .....</i>	<i>16</i>
<i>4.2.2.</i>	<i>Fatores limitantes ao uso agrícola do lodo de esgoto.....</i>	<i>18</i>
<b>4.3.</b>	<b>Legislação, normas e diretivas ambientais .....</b>	<b>19</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>5.1.</b>	<b>Benefícios da disposição em solos do lodo de esgoto .....</b>	<b>24</b>
<b>5.2.</b>	<b>Fatores limitantes à disposição em solos do lodo de esgoto .....</b>	<b>30</b>
<b>5.3.</b>	<b>Métodos de preparo de solo e incorporação de lodo .....</b>	<b>32</b>
<b>5.4.</b>	<b>Viabilidade econômica do lodo: custos de transporte e aplicação .....</b>	<b>34</b>
<b>5.5.</b>	<b>Taxas de mineralização .....</b>	<b>35</b>
<b>5.6.</b>	<b>Relação entre tempo de estudo e observação dos efeitos de lodo em solo ...</b>	<b>37</b>
<b>5.7.</b>	<b>Comparação entre o lodo de esgoto e a adubação mineral na produtividade das culturas .....</b>	<b>38</b>
<b>5.8.</b>	<b>Levantamento das áreas estudadas .....</b>	<b>39</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>41</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>42</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A destinação final de resíduos gerados nos sistemas de tratamento de esgotos é uma questão preocupante no Brasil. O resíduo sólido originado nestes sistemas, genericamente chamado de lodo de esgoto, deve ter uma destinação adequada de forma a garantir a segurança da saúde pública e do meio ambiente. Apesar disso, o planejamento e a destinação final deste resíduo vêm sendo negligenciados no país. Embora até 60% dos custos operacionais de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) sejam destinados à gestão deste resíduo, geralmente os projetos de estação de tratamento não fornecem uma alternativa para destinar o material devidamente, deixando a cargo dos operadores um gerenciamento emergencial dos resíduos, muitas vezes custoso financeira e ambientalmente, além de poder comprometer todo o sistema de coleta e tratamento de esgoto (ANDREOLI, 2001).

Uma tendência observada no Brasil, que deve perdurar até o fim do século, é o aumento considerável da quantidade de lodo de esgoto que requer processamento. Esse aumento pode ser atribuído a alguns fatores, dentre eles estão o crescimento populacional e das indústrias. Mais uma vez, encontrar uma solução de modo a dispor o lodo de forma segura que não traga danos à população e nem impactos ao meio ambiente deve ser prioridade para a comunidade científica e os tomadores de decisão do país (CHAGAS, 2000). Assim, a destinação do lodo é uma questão complexa que geralmente ultrapassa os limites das ETE e requerem uma integração com outros setores da sociedade (FARIA, 2011).

Como dito, o manejo e disposição inadequada do lodo de esgoto desencadeiam uma série de impactos que atingem tanto a saúde pública quanto a do meio ambiente. Dentre os impactos ambientais, estão o comprometimento da saúde química e biológica do solo e água, e a poluição do ar, que por sua vez ocasionam reflexos negativos na biodiversidade e na organização e funcionamento dos ecossistemas. Direta ou indiretamente ligada à integridade do meio ambiente estão o bem-estar e saúde da população, que também sofre com as consequências da má gestão dos resíduos (BETTIOL; CAMARGO, 2006a).

O lodo de esgoto pode ter diferentes composições dependendo das características do efluente que o deu origem, efluente este que pode ser doméstico ou industrial. O primeiro é originado de despejos gerados em residências, edifícios residenciais e comerciais e quaisquer outras edificações que utilizem água para fins domésticos. O efluente industrial, por sua vez, é gerado pela utilização da água para fins industriais e pode ser amplamente diverso, dependendo da atividade da indústria que o originou. A contribuição industrial pode ser admitida na ETE da rede pública (BRASIL, 2011), desde que sua composição seja devidamente considerada no planejamento e dimensionamento da estação. A composição do efluente industrial pode comprometer a qualidade do lodo de esgoto caso seja indevidamente encaminhado para a rede pública, uma vez que pode conter contaminantes e metais pesados que inviabilizem o uso do lodo para outras atividades, como na agricultura (ANDREOLI, 1999).

Em se tratando de destinação do lodo gerado em ETE, Andreoli (2001) estipula que 90% do resíduo produzido no mundo passam por três principais processos em sua destinação final: incineração, disposição em aterros e uso agrícola. Um sistema de tratamento, para atingir o auge de seu sucesso, além de tratar os efluentes, deve também exercer uma função fundamental que é dar uma destinação adequada a seus resíduos. Sua relevância é, inclusive, salientada na Agenda 21 Global em seu capítulo intitulado “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotos”, no qual é enfatizada a busca e adoção de alternativas para minimizar a geração do lodo, assim como sua disposição segura e ambientalmente adequada (BRASIL, 1994).

Apesar disso, qualquer destinação escolhida para o lodo de esgoto requer alguns cuidados para se evitar possíveis impactos. Tratando-se de aterros sanitários, a disposição do lodo exige atenção em relação à escolha do local, às características do projeto para que se evite a percolação de lixiviado, à drenagem dos gases gerados e ao tratamento do chorume produzido, bem como medidas eficientes que evitem a proliferação de vetores (LIRA; GUEDES; SCHALCH, 2008). Em relação ao uso de lodo na agricultura, os principais obstáculos são a aceitação do público, a presença de patógenos, os possíveis riscos de contaminação do lençol freático pela sobrecarga de nutrientes, a perda de aproveitamento devido às concentrações excessivas de metais pesados e os riscos de contaminação da cadeia alimentar por elementos tóxicos (CHAGAS, 2000).

A legislação brasileira já prevê critérios e procedimentos para o devido uso de lodo de esgoto de forma a evitar possíveis danos relacionados à indevida aplicação desse resíduo. A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) N° 375 de 2006 é o principal instrumento regulatório que define parâmetros e exigências do uso agrícola do lodo. Devido ao seu alto teor de matéria orgânica e presença de constituintes químicos inorgânicos, o lodo vem sendo usado na agricultura como fonte de carbono e macro e micronutrientes, sendo considerada uma alternativa de baixo custo para sua disposição (BETTIOL; CAMARGO, 2006a). Segundo a legislação, o lodo gerado em ETE só poderá ter aplicação agrícola mediante submissão a procedimentos de redução de patógenos e de atratividade de vetores (BRASIL, 2006). Além disso, o lodo deve ser caracterizado de acordo com os seguintes aspectos, atendendo aos limites dos parâmetros estabelecidos:

- potencial agrônômico;
- substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas;
- indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos; e
- estabilidade.

Em resumo, a aplicabilidade do lodo de esgoto doméstico como condicionante agrícola é viável e desejável (ANDREOLI, 1999). Assim sendo, diante da necessidade de se encontrar alternativas de dispor o lodo gerado em ETE de forma ambientalmente segura e que não traga malefícios à saúde humana, almeja-se estudar a possibilidade de reuso lodo de esgoto com a disposição em solos e as vantagens agronômicas, ambientais e econômicas em que essa prática resulta.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1. Objetivo geral**

O presente estudo objetiva definir os efeitos do uso de lodo de ETE em solo de acordo com os resultados do levantamento bibliográfico feito de trabalhos teóricos e práticos que utilizaram este resíduo na recuperação ou condicionamento de solos para a agricultura ou recuperação de áreas degradadas, de modo a verificar se esse tipo de reciclagem do lodo é ambiental e socialmente viável e segura.

### **2.2. Objetivos específicos**

Para atingir o objetivo geral descrito acima, os objetivos específicos estabelecidos são:

- Realizar um levantamento bibliográfico de estudos de caso em que foi testada a disposição de lodo de ETE em solo, assim como de trabalhos teóricos que estudaram o tema;
- Identificar os principais parâmetros utilizados pelos autores para avaliar a eficiência ou não do uso de lodo de ETE no condicionamento ou recuperação do solo;
- Compreender a legislação nacional que regulamenta o uso de lodo de ETE como condicionante agrícola.

### **3. METODOLOGIA**

O presente trabalho tem como primeira etapa uma revisão bibliográfica sobre o assunto, visando levantar o conhecimento já produzido sobre o tema. As fontes de informações são artigos, livros, teses e legislações que tratem sobre o tema.

Os tipos de pesquisa aplicados ao longo do trabalho foram as explanatórias e descritivas. A primeira foi aplicada logo no início do trabalho para a realização da revisão bibliográfica, a fim de se criar uma maior familiaridade com o tema. Uma vez reunidos os dados sobre o assunto estudado, foi realizada a pesquisa descritiva visando analisar e interpretar as informações sobre as implicações causadas por disposição de lodo de ETE em solo.

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. Alternativas para a disposição final do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto

As alternativas tecnicamente aceitáveis para destinação final do lodo de esgoto são várias, porém a mais comum é a disposição em aterros sanitários exclusivos, seguida por alternativas como o *landfarming*, aterro sanitário, incineração, recuperação de áreas degradadas ou uso agrícola (CHAGAS, 2000).

Sob a ótica sustentável, a escolha da alternativa como destino final do lodo de esgoto deve considerar a transformação em um lodo de melhor qualidade, reduzindo o percentual de patógenos e metais e reciclando ao máximo o lodo produzido (MARQUES et al., 2007), atendendo o que é preconizado na Agenda 21 Global sobre a busca de uma disposição segura e ambientalmente adequada (BRASIL, 1994).

O **aterro sanitário** geralmente é a técnica escolhida como destino para o lodo com características inadequadas a outros usos de forma benéfica, para recolher o volume que excede a demanda, para a disposição das cinzas do lodo incinerado e como garantia de destinação final adequada independente de quaisquer fatores (RIGO et al., 2014).

Apesar de conveniente em certos aspectos, essa alternativa requer que certos cuidados sejam tomados na sua implantação e manutenção para se evitar degradação do meio ambiente e perigo à saúde humana. Uma vez disposto no aterro, o lodo deve ser recoberto no mesmo dia para evitar problemas como a atração de vetores e liberação de odores (ANDREOLI, 1999).

A produção de percolados também é outra preocupação no planejamento de um aterro, pois uma vez que o líquido lixiviado alcance o lençol freático, ele pode contaminar a água com metais pesados e contaminantes orgânicos, por exemplo. Atingindo as águas superficiais adiciona-se o problema de carreamento de nutrientes, podendo levar à ocorrência da eutrofização.

Para se evitar a contaminação da atmosfera pelos gases resultantes da biodegradação dos resíduos, deve-se drená-los de dentro do aterro e queimá-los.

O aterro exige programa de monitoramento não apenas durante o seu funcionamento, mas também após o encerramento de suas atividades.

Acrescido aos riscos de contaminação da atmosfera, águas superficiais e subterrâneas, solo e, conseqüentemente, de afetar a saúde da população, a disposição de lodo em aterros promove a diminuição da vida útil dos mesmos, além de não promover a reciclagem e nem a recuperação dos nutrientes contidos no lodo de esgoto (QUINTANA; CARMO; MELO, 2011).

A **incineração** é um método que objetiva reduzir o volume de resíduos e minimizar ou mesmo eliminar sua toxicidade por meio da decomposição térmica via oxidação (BETTIOL; CAMARGO, 2006a).

Apesar da diminuição em cerca de 10 a 20 % do volume total do resíduo (RIGO et al., 2014), a incineração não é capaz de eliminar os metais pesados do lodo de esgoto, como faz com os organismos patogênicos e compostos orgânicos tóxicos. Além disso, é uma alternativa de alto custo por tonelada tratada e traz problemas secundários como a poluição atmosférica e a geração de cinzas que precisam ser destinadas adequadamente (ANDREOLI, 1999).

O **landfarming** consiste na utilização do solo como um sistema de tratamento, que passa a ser o suporte para a atividade biológica, retenção de metais, local de exposição ao sol e biooxidação, o que provocará a degradação da matéria orgânica (CHAGAS, 2000).

Seu principal objetivo é a degradação do lodo pelos microrganismos do perfil do solo e a retenção de metal pesado no mesmo, não havendo preocupação na reciclagem de nutrientes e nem uso da matéria orgânica contidos no lodo (RIGO et al., 2014).

O lodo também pode ser usado na **recuperação de áreas degradadas**, que se caracterizam por não propiciarem condições de desenvolvimento e fixação da vegetação, pois carecem de matéria orgânica. Nesse sentido, a aplicação de lodos nessas áreas traz benefícios às propriedades físicas do solo, condicionando-o de forma a melhorar a formação de agregados, a infiltração, a retenção de água e a aeração do solo

(FARIA, 2011). Dessa forma, promove um acelerado estabelecimento e crescimento de plantas como gramíneas e leguminosas, fazendo com que cresçam mais vigorosas com maior percentual de cobertura, maiores produtividades e melhor desenvolvimento do sistema radicular (BARBOSA; TAVARES FILHO, 2006).

A vegetação também pode ser renovada com a aplicação de calagem e fertilização mineral, contudo essas técnicas não são capazes de melhorar as condições físicas e biológicas do solo como acontece com o uso do lodo de esgoto, o que pode resultar na deterioração da cobertura vegetal antes que se verifique a efetiva recuperação do solo (ANDRADE; MATTIAZZO, 2000).

#### **4.2. Uso agrícola**

A utilização de lodo de esgoto como biofertilizante e condicionador de solos pode ser considerada a mais adequada em termos técnicos, econômicos e ambientais (BARBOSA; TAVARES FILHO, 2006), desde que devidamente respeitadas as regras que definem as exigências de qualidade do material a ser reciclado e aos cuidados exigidos para estabilização, desinfecção e normas de utilização que incluam as restrições de uso (BRASIL, 2006).

A reciclagem agrícola alia baixo custo e impacto ambiental positivo quando realizada segundo os devidos critérios, além de ser a alternativa de destinação final do lodo mais ambientalmente correta, pois promove o retorno dos nutrientes ao solo, colaborando para o fechamento no ciclo dos elementos (ANDREOLI, 1999).

A disposição do lodo em solo permite ganhos ao produtor por meio do aumento da produtividade das culturas e redução do uso de fertilizantes minerais, da mesma forma que gera benefícios aos geradores de lodo pela aplicação de métodos adequados e mais econômicos de disposição final desse resíduo (GUEDES et al. 2006).

É uma técnica amplamente utilizada em diversos países (Bélgica, 29%; Dinamarca, 54%; França, 58%; Alemanha, 27%; Itália, 33%; Espanha, 50%; Reino Unido, 44%) há vários anos, sendo que nos Estados Unidos o uso de lodo de esgoto como fertilizante data de 1927 (BARBOSA; TAVARES FILHO, 2006). Da mesma



forma, pode ser muito benéfica se implementada no Brasil, onde se faz necessária a reposição do estoque de matéria orgânica dos solos devido ao intenso intemperismo das condições climáticas (BETTIOL; CAMARGO, 2006a).

#### *4.2.1. Benefícios do uso agrícola do lodo de esgoto*

Embora no Brasil a quantidade de pesquisas sobre a aplicação de lodo de esgoto para fins agrícolas e florestais sejam insatisfatórios, os resultados têm mostrado que essa prática pode trazer benefícios nas esferas agrônômicas, ambientais e econômicas (BETTIOL; CAMARGO, 2006b).

Quando incorporado ao solo, o lodo de esgoto promove alterações em suas propriedades físicas, como densidade do solo, tamanho dos agregados e capacidade de retenção de água; químicas, como pH, condutividade elétrica, capacidade de troca catiônica (CTC) e teores de fósforo e nitrogênio; e biológicas, incrementando a atividade biológica quando não há limitações impostas por altas concentrações de elementos tóxicos e metais pesados (ARAUJO; GIL; TIRITAN, 2009).

Devido à elevada carga de matéria orgânica e de macro e micronutrientes existentes no lodo de esgoto, pode-se compará-lo a um biofertilizante potencial, atribuindo ao solo benefícios que não são trazidos pela adição de adubos químicos (QUINTANA; CARMO; MELO, 2011). A matéria orgânica presente no lodo de esgoto permite tanto a incorporação dos macronutrientes (como nitrogênio e fósforo principalmente) e dos micronutrientes (como zinco, cobre, ferro, manganês e molibdênio) aos solos agrícolas quanto a promoção do crescimento de organismos do solo de papel fundamental na ciclagem desses elementos, contribuindo para o bom desenvolvimento das plantas e obtenção de produtividade das culturas (SILVA et al., 2001).

Os benefícios à atividade agrícola pela reciclagem de lodo de esgoto se dão também pelas alterações físicas e químicas no solo que essa prática promove. Esses benefícios ao solo se dão pela melhoria de sua densidade, porosidade e capacidade de retenção de água (MACEDO et al. 2006b), além de aumentar seu nível de fertilidade,

elevando o pH, diminuindo o teor de alumínio trocável, acrescentando sua CTC e a capacidade de fornecer nutrientes para as plantas (GARCIA et al., 2009b).

Além dos benefícios trazidos à agricultura pela aplicação do lodo de esgoto em solo, somam-se importantes vantagens da sustentabilidade ambiental, sendo representadas pela reciclagem de nutrientes e da energia (matéria orgânica) nele contidos e pela preservação das jazidas que fornecem os minérios utilizados na fabricação dos adubos químicos (DYNIA; BOEIRA; SOUZA, 2006).

Aos benefícios agronômicos e ambientais se somam os econômicos, uma vez que são economizados cerca de 100 mil barris de petróleo por ano em forma de energia para produzir a mesma quantidade de fertilizante químico que as ETE da Grande São Paulo produzem por dia em forma de lodo, totalizando 2000 t de resíduo contendo, em média, 20 toneladas de nitrogênio (N), 50 t de  $P_5O_5$ , 6 t de óxido de potássio ( $K_2O$ ) e 120 t de matéria orgânica (QUINTANA; CARMO; MELO, 2011). Na agricultura, os três macro nutrientes indispensáveis para a fertilidade de qualquer cultivo são o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Os compostos químicos  $P_5O_5$  e  $K_2O$  são a formulação em que os elementos P e K se apresentam no mercado, que são assimiláveis pelas plantas (CAMPOS; ALVES, 2008).

Da mesma forma em que há economia de energia diminuindo a produção de adubo químico, a destinação do lodo de esgoto como fertilizante para a agricultura gera benefícios econômicos para os produtores agrícolas que passam a consumir um adubo mais barato que traz melhorias para a produtividade de sua lavoura e para os geradores de lodo, que evitam destinos mais custosos e com maior impacto no ambiente e na população como a disposição em aterros sanitários (FARIA, 2011).

#### *4.2.2. Fatores limitantes ao uso agrícola do lodo de esgoto*

A aplicação de lodo de esgoto em solo, apesar de muito benéfica nas esferas agronômicas, ambientais e econômicas, deve ser implementada levando-se em consideração alguns fatores de risco associados ao seu uso. Em sua composição, o lodo de esgoto pode apresentar agentes patogênicos ao homem e elementos tóxicos, cujos

efeitos ainda não são totalmente conhecidos quando utilizados na agricultura (BETTIOL; CAMARGO, 2006b). É válido lembrar que, no Brasil, as escassas pesquisas científicas sobre a técnica de reciclagem de lodo na agricultura ainda estão em fase de desenvolvimento e não respondem a todas essas questões, sendo um fator ponderável a ser considerado quando do uso agrícola do lodo.

A presença desses elementos tóxicos pode ser evidenciada pelas altas concentrações de metais pesados, que são os elementos químicos com densidade maior que  $5 \text{ g/cm}^3$  potencialmente tóxicos às plantas e aos animais e que, ao contrário dos patógenos e dos compostos orgânicos geralmente presentes no lodo, podem se acumular no solo por tempo indeterminado, dependendo do elemento e das características físico-químicas do solo (FARIA, 2011). Além do potencial acúmulo dos metais pesados em solo, outras grandes preocupações levantadas pela aplicação agrícola do lodo de esgoto é a posterior absorção pelas plantas desses elementos em concentrações tóxicas podendo ocasionar a contaminação da cadeia alimentar e a transferência desses elementos às águas subterrâneas e superficiais por processos de lixiviação e escoamento superficial (SILVA et al., 2006).

Em relação aos patógenos, a Resolução CONAMA Nº 375 de 2006 preconiza que, para que o lodo de esgoto possa ter aplicação agrícola, o resíduo deve passar por um processo de estabilização, ou seja, parte de sua matéria orgânica é biodegradada visando à redução de patógenos e da atratividade de vetores (BRASIL, 2006). Porém, nem sempre apenas a estabilização é suficiente para remover alguns tipos de microrganismos patogênicos. Quando essa estabilização química e biológica é feita de forma adequada, o lodo passa a ser nomeado de biossólido (ANDREOLI, 2001).

### **4.3. Legislação, normas e diretivas ambientais**

Segundo a **Lei Federal Nº 12.305 de 2010**, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, a definição dada para resíduos sólidos é de:

“Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos

cuja particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.” (BRASIL, 2010).

Dessa forma, o lodo gerado em ETE se encaixa na definição de resíduos sólidos por ser um material em estado semissólido descartado resultante de atividades humanas e, portanto, sua gestão deve ser regida de acordo com o estabelecido por esta lei.

A Política prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de hábitos de consumo sustentável e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos (aquilo que tem valor econômico e pode ser reciclado ou reaproveitado) e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (aquilo que não pode ser reciclado ou reutilizado) (BRASIL, 2010).

Assim, a reutilização agrícola do lodo de esgoto vai de encontro com objetivos da lei no que concerne a reciclagem e reutilização de resíduos sólidos; da mesma forma que a destinação para aterros sanitários de lodo com características inadequadas a outros usos benéficos, para o volume que excede a demanda e para a disposição das cinzas do lodo incinerado atende o estabelecido para a destinação ambientalmente adequada de rejeitos.

Da mesma forma, o capítulo 21 da **Agenda 21 Global** intitulado “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotos” destaca que o manejo ambientalmente saudável dos resíduos deve promover a redução ao mínimo dos resíduos, o aumento ao máximo de sua reutilização e reciclagem ambientalmente saudáveis e a promoção do depósito e tratamento ambientalmente saudáveis dos rejeitos (BRASIL, 1994), estratégia na qual o lodo está incluído.

A **Agenda 21 Brasileira** em seu capítulo 3 intitulado “Estratégias e Ações propostas para os seis temas da Agenda 21 Brasileira” aborda a área temática da “Agricultura Sustentável”, que incentiva a criação de mecanismos que estimulem a compostagem da matéria orgânica do lodo do esgoto para uso na agricultura de forma ambientalmente segura e sustentável (BRASIL, 2004).

Especificamente em relação ao lodo, foi publicada a **Resolução CONAMA N° 375 de 2006** como o principal instrumento regulatório que define parâmetros e procedimentos para o uso agrícola do lodo proveniente de ETE e seus produtos derivados, visando benefícios à agricultura e evitando riscos à saúde pública e ao ambiente.

A lei compreende que a produção de lodo de esgoto é uma característica intrínseca dos processos de tratamento de esgotos existentes e que seu crescimento é proporcional ao aumento da população humana. Dessa forma, indica que encontrar uma solução para sua disposição é uma medida que deve ser tomada com urgência.

Complementarmente afirma que, apesar de passível de conter metais pesados, compostos orgânicos persistentes e patógenos em concentrações perigosas à saúde e ao ambiente, o lodo de esgoto possui matéria orgânica e nutrientes para as plantas e que seu uso no solo pode ser benéfico para a agricultura. Afirma ainda que, “a aplicação do lodo de esgoto na agricultura se enquadra nos princípios de reutilização de resíduos de forma ambientalmente adequada” (BRASIL, 2006), que vem de encontro com o que é instituído tanto na Política Nacional dos Resíduos Sólidos quanto nas Agendas 21 Global e Brasileira.

Toda autorização para a aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas é condicionada à apresentação de licenciamento ambiental e de um projeto agrônomo, que pode ser definido como um projeto elaborado por profissional habilitado visando à aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado em determinada área agrícola, observando os critérios e procedimentos estabelecidos pela legislação. Esse projeto, dentre outras exigências, deve conter informações sobre a caracterização do lodo a ser utilizado, da área e do solo onde esse lodo será aplicado, da taxa de aplicação desse resíduo no solo e dos planos de aplicação, manejo e monitoramento das atividades agrícolas das áreas tratadas com lodo de esgoto (BRASIL, 2006).

Ainda segundo a Resolução CONAMA N° 375 de 2006, os lodos gerados em ETE, para terem aplicação agrícola, deverão ser submetidos a processo de redução de patógenos e da atratividade de vetores, ou seja, devem ser estabilizados.

A caracterização do lodo de esgoto a ser aplicado no solo deve incluir informações sobre seu potencial agrônomo (como carbono orgânico, pH, fósforo e

nitrogênio amoniacal); substâncias inorgânicas (metais pesados como arsênio, chumbo e mercúrio) e orgânicas potencialmente tóxicas; indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos (como coliformes termotolerantes e *Salmonella*); e estabilidade. Os limites máximos de concentração aceitável para o uso de lodo de esgoto na agricultura devem respeitar os parâmetros estipulados pela legislação, como mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Limites máximos definidos na Resolução CONAMA N° 375/2006 para substâncias inorgânicas e agentes patogênicos presentes no lodo de esgoto a ser aplicado no solo.**

Parâmetro	Unidade	Concentração máxima permitida
Arsênio	mg/kg	41
Bário	mg/kg	1300
Cádmio	mg/kg	39
Chumbo	mg/kg	300
Cobre	mg/kg	1500
Cromo	mg/kg	1000
Mercúrio	mg/kg	17
Molibdênio	mg/kg	50
Níquel	mg/kg	420
Selênio	mg/kg	100
Zinco	mg/kg	2800
Coliformes Termotolerantes	NMP/g de ST	1000
Ovos viáveis de helmintos	Ovo/g de ST	0,25
<i>Salmonella</i>	P/A em 10 g de ST	Ausência
Vírus	UFP ou UFF/g de ST	0,25

ST: Sólidos Totais, NMP: Número Mais Provável, UFF: Unidade Formadora de Foco, UFP: Unidade Formadora de Placa. Fonte: BRASIL, 2006.

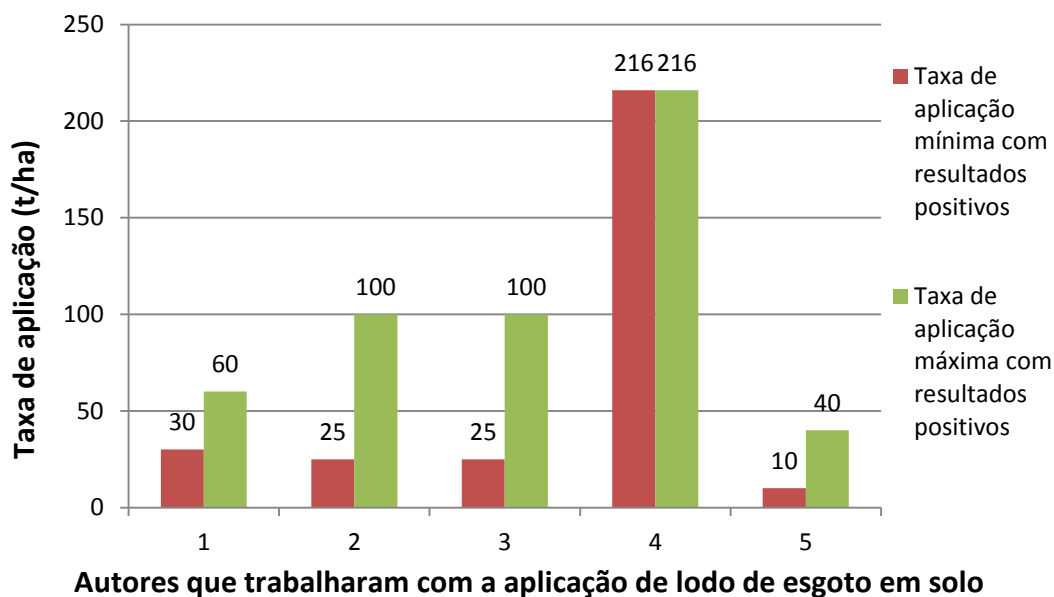
É importante salientar que nem todas as culturas estão autorizadas a receber lodo de esgotos, como é o caso de pastagens, cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo para evitar possíveis danos à saúde de animais e da população que venha a se alimentar dessas culturas. Há ainda restrição para a aplicação de lodo em solo em locais muito próximos a corpos d'água como em Áreas de Preservação Ambiental, Área de Proteção aos Mananciais e áreas onde a profundidade do nível do lençol freático seja inferior a 1,5 m para evitar contaminações das águas (BRASIL, 2006).

É interessante ressaltar que, mesmo antes da elaboração da Resolução CONAMA Nº 375/2006, alguns estados brasileiros já tinham normas ou manuais próprios guiando a maneira mais adequada de se realizar a aplicação agrícola do lodo de esgoto. É o caso do estado de São Paulo, onde a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental) publicou em 1999 suas normas provisórias estaduais (Norma Técnica P4.230) que regulamentavam o uso agrícola de lodos resultantes de ETE. No estado do Paraná, a SAPENAR (Companhia de Saneamento do Paraná) também elaborou e publicou manuais técnicos para orientar o usuário do lodo de esgoto, os operadores das estações de tratamento e os tomadores de decisão sobre os procedimentos de produção do lodo, os métodos de higienização adequados ao uso agrícola, as vantagens, fatores limitantes e procedimentos para o uso do resíduo em áreas de produção, além de orientar a elaboração de Plano de Distribuição de Lodo e monitoramento da atividade. Com a publicação da Resolução CONAMA, os estados podem elaborar ou continuar seguindo normas próprias, porém levando em consideração que as normais estaduais nunca podem ser mais permissivas que a norma federal, apenas mais restritiva (PIRES, 2006).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Benefícios da disposição em solos do lodo de esgoto

De forma geral, pode-se dizer que mais de 60% dos trabalhos estudados obtiveram resultados positivos com a aplicação de diferentes doses de lodo de esgoto em solo (Figura 1), seja como vantagens agrônômicas, ambientais ou econômicas. Os resultados positivos englobam melhorias nas características físicas, químicas e biológicas do solo, com reflexos no aumento da fertilidade, estímulo da atividade microbiana, incremento no crescimento e desenvolvimento das culturas, incorporação de macro e micronutrientes, dentre outros, corroborando as informações levantadas na revisão bibliográfica.



**Figura 1 - Taxas mínimas de aplicação de lodo de esgoto em solo que resultaram em impactos positivos. Referências: 1 - Campos e Alves (2008); 2 - Garcia et al. (2009a); 3 - Garcia et al. (2009b); 4 - Silva, Resck e Sharma (2002a); 5 - Andrade e Mattiazzo (2000).**

Araujo, Gil e Tiritan (2009), objetivando avaliar os efeitos da aplicação de lodo de esgoto e adubação mineral nitrogenada em um argissolo sobre a fertilidade do solo, a atividade microbiana, o rendimento de matéria seca e o fornecimento de nutrientes à cultura de braquiária, obtiveram melhores resultados com a aplicação da amostra de



lodo que continha a maior concentração de nitrogênio. Para calcular a taxa de aplicação do lodo, baseou-se no cálculo de nitrogênio exigido pela cultura da braquiária (40 kg de N/ha), o teor desse elemento disponível para as plantas no lodo e sua taxa de mineralização, obtendo-se três doses equivalentes a 1, 2, e 4 vezes a concentração de nitrogênio requerido por essa cultura. Proveniente da ETE de Franca (SP), o lodo era de origem residencial com baixos teores de metais pesados.

De modo geral, Araujo, Gil e Tiritan (2009) obtiveram aumento relativo nos teores de fósforo, matéria orgânica, ferro e zinco no solo nos tratamentos com as maiores doses de lodo, além de aumentos significativos na produção de massa seca da parte aérea. Com o uso de doses crescentes de lodo de esgoto, observou-se também o estímulo da atividade microbiana, que pode refletir a influência positiva da baixa concentração de metais pesados no solo sobre a biomassa microbiana. Por fim, verificou-se que a mineralização do nitrogênio é mais lenta quando o solo recebe doses elevadas de esgoto ao se constatar que a quantidade de nitrogênio do tecido foliar da gramínea, em todos os tratamentos que receberam adubação mineral ou orgânica, foi significativamente maior que a testemunha, ou seja, as maiores doses de lodo não aumentaram proporcionalmente as concentrações de nitrogênio na planta.

Boeira e Maximiliano (2006), com o objetivo de se obter a definição de doses adequadas de lodo a serem aplicadas ao solo do tipo latossolo de forma a evitar a geração de nitrato em quantidade superior à capacidade de absorção das plantas, conduziram ensaios em laboratório para o estudo da dinâmica da mineralização de dois lodos de esgoto, um de origem domiciliar, produzido na ETE de Franca (SP) e outro de origem urbano-industrial, produzido na ETE de Barueri (SP). Para tal, foram avaliadas doses equivalentes a 3, 6, 12 e 24 t/ha de lodo de Franca, e 8, 16, 32 e 64 t/ha de lodo de Barueri. Os resultados permitiram concluir que a fração de mineralização do nitrogênio orgânico dos lodos de esgoto estimada foi adequada para a determinação da dose máxima a ser aplicada em campo, baseando-se no critério da necessidade de nitrogênio na cultura e com o objetivo de evitar geração excessiva de nitrato.

Deve ser observado que o nitrogênio aplicado via lodo de esgoto pode ter um efeito residual no solo, ou seja, nem todo o nitrogênio orgânico é mineralizado prontamente. Dessa forma, quantidades decrescentes vão sendo disponibilizadas ao solo ao longo do tempo após sua aplicação inicial. Além disso, como a capacidade de

retenção do nitrato no solo geralmente é baixa, se esse elemento não for absorvido pelas plantas pode ser lixiviado, contaminando águas subterrâneas. Portanto, esse efeito residual e a capacidade de retenção pelas plantas devem ser levados em consideração para determinar a dose ideal de aplicações sucessivas de lodo em uma mesma área, visando à redução dos riscos de lixiviação do nitrato (BOEIRA; MAXIMILIANO, 2006).

Bezerra et al. (2005) estudaram o efeito no crescimento e desenvolvimento do algodoeiro irrigado com esgoto doméstico tratado e com água de abastecimento e adubado com diferentes doses de lodo de esgoto (0; 0,1125 e 0,225 t/ha) de Campina Grande (PB) por meio da avaliação da altura das plantas, diâmetro do caule e área foliar por planta. Os resultados mostraram que todas as variáveis sofreram aumento com doses crescentes de lodo de esgoto e irrigação com água residuária, indicando que as elevadas doses de nitrogênio e o alto teor de matéria orgânica presentes tanto na água de irrigação com esgoto tratado quanto no fertilizante lodo de esgoto favoreceram o crescimento e desenvolvimento do algodoeiro.

Com o intuito de analisar a influência do lodo de esgoto na recuperação de algumas propriedades físicas, principalmente da densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, de um latossolo degradado e no desenvolvimento de eucalipto e braquiária, Campos e Alves (2008) realizaram um experimento com os seguintes tratamentos: vegetação natural de cerrado, solo exposto (sem tratamento para recuperação), solo cultivado com eucalipto e braquiária com e sem aplicação de adubação mineral e solo cultivado com eucalipto e braquiária com uso de 30 e 60 t/ha de lodo de esgoto oriundo do SANEAR (Saneamento de Araçatuba – SP).

Campos e Alves (2008) observaram que o lodo de esgoto influenciou as propriedades físicas e o desenvolvimento das plantas quando comparados o solo exposto (sem tratamento para recuperação) e o solo que recebeu tratamentos para recuperação, cultivado com eucalipto e braquiária. A densidade do solo, a porosidade total e a macroporosidade foram melhores indicadores da recuperação do solo, enquanto que o uso de doses crescentes de lodo de esgoto proporcionou maior rendimento de matéria verde e seca da braquiária e promoveu maior crescimento das plantas de eucalipto.

Galdos, De Maria e Camargo (2004) realizaram um experimento com duração de dois anos para determinar as alterações em propriedades químicas, principalmente sobre os teores de fósforo, cobre, níquel e zinco, de um latossolo cultivado com milho. O estudo consistiu no uso de doses de lodo de esgoto de ETE de Jundiaí (SP) definidas com base na necessidade de nitrogênio pela cultura, sendo que a dose testemunha recebeu apenas adubação química e as duas doses de lodo contavam com a dose recomendada de nitrogênio e o dobro dessa quantidade, respectivamente. Os resultados mostraram um aumento em até 25% da produtividade das parcelas cultivadas com ambas as doses lodo de esgoto em contraste com aquelas que receberam apenas adubação mineral, além do aumento dos teores de cobre, níquel e zinco no solo e fósforo e zinco na planta com esse tipo de fertilização.

Garcia et al. (2009a) aplicaram doses de lodo de esgoto de 0, 25, 50, 75 e 100 t/ha oriundo da ETE de Jerônimo Monteiro (ES) em um solo de baixa fertilidade de local em processo de degradação para avaliar a influência sobre a nutrição mineral de mudas de eucalipto, obtendo como resultados o incremento dos teores foliares de nitrogênio, fósforo, potássio, zinco e cobre, a diminuição dos teores de magnésio, boro e ferro e a inalteração da concentração de manganês com o aumento das doses de lodo.

Da mesma forma que em Garcia et al. (2009a), Garcia et al. (2009b) adicionaram a um solo degradado doses de lodo de esgoto de 0, 25, 50, 75 e 100 t/ha oriundo da ETE de Jerônimo Monteiro (ES) para estudar os efeitos na recuperação de um solo degradado. Observaram que a aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto tratado com cal promoveu o aumento do pH, dos teores de matéria orgânica, fósforo, potássio, sódio, cálcio, CTC total e efetiva, soma de bases e diminuição dos valores de magnésio, alumínio e H+Al no solo.

Baseados na hipótese de que o lodo de esgoto pode ser utilizado como fertilizante para a cultura de eucalipto, Guedes et al. (2006) desenvolveram seu experimento visando avaliar se a aplicação de lodo melhora as propriedades químicas do solo e favorece a absorção de nutrientes por plantas de eucalipto em fase de crescimento inicial. O experimento foi montado com os seguintes tratamentos: testemunha, adubação mineral e doses de lodo proveniente da ETE de Barueri (SP) de 10, 20, 40, 80 e 160 t/ha. Os resultados obtidos permitiram concluir que a aplicação de lodo alcalino melhora as propriedades químicas do solo, diminuindo a acidez e

umentando a disponibilidade da maioria dos nutrientes. A utilização de lodo propiciou aumento dos teores foliares de cálcio, nitrogênio, fósforo e enxofre e a diminuição dos teores de manganês e magnésio em plantas jovens de eucalipto.

Silva et al. (2001) estudaram o efeito da aplicação de 0, 20 e 40 t/ha de lodo de esgoto da ETE de Barueri (SP), na presença e ausência de fertilizante mineral e nos teores de metais pesados de um argissolo cultivado com cana de açúcar. O lodo de esgoto aumentou o pH do solo e forneceu cálcio, fósforo, enxofre e zinco. Seus efeitos foram de curta duração, restringindo-se a um ano agrícola. Os teores dos metais pesados das amostras de solo tratado foram maiores que os da testemunha, mas menores que os valores considerados perigosos ao ambiente. Assim como levantado por Nogueira et al. (2008), a aplicação do lodo de esgoto pode ser preocupante por enriquecer o solo em metais pesados (níquel, cádmio, chumbo e cromo) considerados perigosos do ponto de vista ambiental, podendo causar efeitos deletérios nos animais, caso entrem na cadeia trófica. Por isso, salienta-se a necessidade de monitoramento do acúmulo dos metais pesados devido à aplicação de lodo no solo para evitar danos ao meio ambiente.

Silva et al. (2010), visando avaliar os efeitos da aplicação de lodo de esgoto, complementado ou não com fertilizante mineral, sobre a nutrição e produtividade da cana de açúcar, o potencial do lodo em fornecer nutrientes e os possíveis impactos causados pela presença de metais pesados em solo, aplicaram o resíduo da ETE de Barueri (SP) em argissolo nas doses de 0, 20 e 40 t/ha. Obtiveram que o lodo de esgoto aplicado ao solo atuou como fertilizante e corretivo de acidez para a cultura de cana-de-açúcar, principalmente como fonte de cálcio, fósforo, enxofre e zinco, propiciando uma melhor formação da estrutura física do solo e aumento da produtividade agrícola. Por fim, a adição de lodo ao solo aumentou os teores de cádmio e níquel no solo e na planta, mas em níveis que não oferece qualquer risco de transmissão à cadeia trófica no período do estudo.

Em Silva, Resck e Sharma (2002a), o lodo produzido na ETE de Brasília (GO) foi testado em um latossolo como fertilizante na produção de milho, como fonte de fósforo em comparação ao superfosfato triplo e como aporte de metais pesados trazidos pela aplicação deste resíduo no solo. Os tratamentos compreenderam: testemunha, doses de 54, 108 e 216 t/ha de lodo de esgoto e adubação mineral com superfosfato triplo como fonte de fósforo. Obtiveram como resultados que a maior dose de lodo forneceu

quantidades adequadas de macro e micronutrientes, a eficiência do lodo como fonte de fósforo ao milho superou em 25% à do superfosfato triplo e os níveis de metais pesados (cádmio, chumbo e mercúrio) gerados pelo lodo se mostraram abaixo dos níveis considerados restritivos à sua utilização agrícola.

Andrade e Mattiazzo (2000) aplicaram lodo oriundo da ETE de Barueri (SP) em doses de 10, 20 e 40 t/ha em latossolo cultivado com eucalipto para avaliar a lixiviação de nitratos e dos metais pesados cádmio, cromo, cobre, níquel e zinco em solo e a fitodisponibilidade desses elementos. Concluíram que a aplicação do lodo não provocou movimentação de nitratos e nem dos metais cádmio, cromo, cobre e níquel no solo, tendo apenas o elemento zinco se acumulado em camadas mais profundas do solo, indicando sua movimentação. A aplicação de doses crescentes do lodo até 40 t/ha proporcionou aumento na disponibilidade de nitrogênio às plantas de eucalipto durante o período de estudo, enquanto os metais cádmio, cobre, níquel e zinco não tiveram a fitodisponibilidade alterada em função das doses de lodo aplicadas ao solo.

No estudo com tratamentos correspondentes à testemunha, adubação mineral e doses de 10, 20 e 40 t/ha de lodo de esgoto proveniente da ETE de Barueri (SP) aplicados em latossolo, Lira, Guedes e Schalch (2008) visaram avaliar o efeito da utilização de lodo sobre os estoques de carbono e nitrogênio nos eucaliptos, na serapilheira, no solo e no lodo remanescente após cinco anos de aplicação. Com o experimento, observaram que o lodo é capaz de suprir as exigências de nitrogênio tanto quanto a adubação mineral, inclusive incrementando o desenvolvimento do eucalipto com aumento de sua biomassa. A aplicação de lodo contribuiu com o aumento de estoques de carbono e nitrogênio apenas na biomassa aérea dos eucaliptos, ao contrário do que ocorreu no solo, em que não foi observado o aumento da fixação desses elementos.

Nascimento et al. (2004) verificaram o efeito da aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto da ETE de Recife (PE) de 0, 10, 20, 30, 40 e 60 t/ha sobre as características químicas de dois tipos de solos com diferentes teores de argila (Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média e Espodossolo Cárbico hidromórfico textura arenosa), quantidades de metais pesados absorvidos e crescimento de plantas de milho e de feijoeiro.

As aplicações de doses crescentes de lodo promoveram diminuição do pH e aumento dos teores de matéria orgânica, nitrogênio total, fósforo, potássio, sódio, cálcio e magnésio em ambos os solos, exceção feita aos teores de sódio e potássio de um deles (NASCIMENTO et al., 2004). As doses de lodo de esgoto aumentaram a produção de matéria seca do milho e do feijoeiro, embora abaixo da obtida pela fertilização mineral completa. Além disso, a textura do solo é fator importante na disponibilidade dos metais para absorção pelas plantas, tendo sido observado maior absorção no Espodossolo Cárbico hidromórfico textura arenosa do que no Argissolo vermelho-amarelo distrófico textura média.

Paiva et al. (2009) objetivaram avaliar comparativamente o crescimento inicial de mudas de espécies nativas frequentemente utilizadas em plantios visando à restauração florestal, adubadas com diferentes doses de lodo (0 a 20 g/dm<sup>3</sup>) produzido na ETE de Barueri (SP) e com fertilizante mineral. Os resultados mostraram que a aplicação de lodo de esgoto teve efeito positivo no crescimento das mudas, sendo que a dose mais elevada de lodo propiciou crescimento e produção de biomassa semelhantes ao observado com adubação mineral. Foi constatado ainda que as espécies de início de sucessão (aroeira-pimenteira, pau-de-viola e unha-de-vaca) foram mais eficientes no aproveitamento dos nutrientes disponibilizados do que as espécies dos estágios sucessionais mais avançados (cabreúva-vermelha).

Rocha et al. (2013), estudando o uso de composto de lodo de esgoto proveniente da ETE de Jundiaí (SP) como componente de substrato juntamente com casca de arroz carbonizada para produção de mudas de eucalipto, verificaram que os resultados de crescimento e nutrição com seu uso foram maiores do que com o substrato comercial. Os resultados mostraram ainda que a utilização de composto de lodo de esgoto em níveis acima de 40% foi favorável ao desenvolvimento das mudas, sendo uma forma viável de destinação deste material.

## **5.2. Fatores limitantes à disposição em solos do lodo de esgoto**

Observaram-se também em alguns trabalhos as consequências negativas que o uso agrícola do lodo de esgoto pode trazer previstos pela literatura, principalmente o

acúmulo no solo de metais pesados, nitrogênio e fósforo e a lixiviação desses elementos, como salientado por Silva et al. (2001) e Nogueira et al. (2008), que levantaram o alerta para se monitorar o acúmulo de metais pesados no solo decorrente de aplicações sucessivas deste resíduo em solo.

Visando avaliar as consequências de aplicações repetidas de lodo de esgoto proveniente de ETE de Franca e Barueri (SP) em latossolo cultivado com milho sobre o movimento de nitrato no perfil do solo, Dynia, Boeira e Souza (2006) realizaram um experimento de longa data baseado na coleta de amostras de solo após três cultivos de milho e da solução do solo no quarto cultivo. Foram avaliados tratamentos com adubação mineral e com diferentes doses de lodo, calculadas de forma que cada dose fornecesse ao milho 0, 1, 2, 4 e 8 vezes a concentração de nitrogênio requerido por essa cultura.

Desse experimento, Dynia, Boeira e Souza (2006) obtiveram como resultado as maiores taxas de lixiviação para os tratamentos com lodo de esgoto, sendo que o carreamento de nitrato aumentou com as doses e o número de aplicações. No tratamento com dose de lodo com taxa de aplicação de oito vezes a recomendação nitrogenada para a cultura foi constatado que, no período de tempo de apenas três safras, cerca de 24% do nitrogênio aplicado via lodo de esgoto foram lixiviados para a camada 0,6-2,2 m. Nessa profundidade, o nitrato está praticamente fora do alcance das raízes das plantas, ficando suscetível à lixiviação para o lençol freático, demonstrando que a aplicação em doses excessivas de lodo resulta em desperdício de nitrogênio e aumento do risco de contaminação das águas subterrâneas com nitrato.

Munhoz e Berton (2006) realizaram um experimento de longa duração após duas aplicações sucessivas de lodo de esgoto de ETE de Franca e Barueri (SP) em latossolo e dois ciclos produtivos da cultura do milho para verificar a eficiência do lodo como fonte de fósforo, quando comparado à adubação mineral, a ocorrência de mudanças na capacidade de adsorção de fósforo pelo solo e a redistribuição do fósforo entre as principais frações do elemento no solo. Quantidades elevadas de fósforo presentes em lodo de esgoto podem modificar alguns aspectos da dinâmica do fósforo no solo, além de oferecer risco de contaminação quando carreados para as águas superficiais, podendo levar à eutrofização dos corpos d'água.

Munhoz e Berton (2006) verificaram que absorção do fósforo por cultura de milho é menor quando a fonte utilizada é o lodo de esgoto em comparação com a adubação mineral, tendo sido encontrados valores médios de 34% de eficiência. Foi verificado também que a aplicação de lodo, além de causar a diminuição da adsorção do fósforo e de sua energia de ligação no solo, gerou uma redistribuição do fósforo no solo, com aumento das frações mais lábeis em detrimento da fração residual. Desta forma, apesar da eficiência do lodo ser menor do que da adubação mineral em relação ao fósforo, nem sempre esta diferença se manifesta na produtividade da cultura.

Silva et al. (2006) verificaram uma tendência de acúmulo de metais pesados em solo e em plantas após aplicarem doses crescentes de lodo de esgoto oriundos de ETE Barueri e Franca (SP) em latossolo cultivado com milho durante três anos consecutivos. Os resultados mostraram aumento nos teores de cobre, manganês e zinco nas folhas; manganês, níquel e zinco nos grãos de milho; e cobre, níquel e zinco no solo. Como os maiores teores de metais pesados foram observados nas folhas, isso implica em maiores possibilidades de transferência de metais pesados para a cadeia alimentar, caso essa parte da planta seja consumida. O aumento dos teores dos metais foi proporcional às doses aplicadas de lodo, que corresponderam a 1, 2, 4, e 8 vezes a recomendação de adubação nitrogenada para a cultura do milho.

Marques et al. (2007) obtiveram como resultado da aplicação de doses de 0, 10, 20 e 40 t/ha de lodo de esgoto da ETE de Suzano (SP) em argissolo cultivado com cana de açúcar o aumento dos teores de metais pesados (cromo, níquel, chumbo e zinco) no solo, sendo que a maior dose de 40 t/ha foi a que promoveu os maiores teores desses elementos.

### **5.3. Métodos de preparo de solo e incorporação de lodo**

A busca por outros métodos de incorporação do lodo em solo que não prejudiquem suas contribuições à agricultura é sugerida pelos resultados obtidos por Macedo et al. (2006a) e Macedo et al. (2006b), que constaram que, tanto o preparo do solo com aração e gradagem, quanto a incorporação do lodo com enxada rotativa, são



métodos que neutralizam possíveis benefícios oriundos da aplicação de matéria orgânica do lodo.

Visando estudar a interferência da aplicação de adubação mineral e de diferentes tratamentos de lodo de esgoto (doses com 1, 2, 4 e 8 vezes a concentração de nitrogênio disponibilizada pela adubação mineral) de ETE Barueri e Franca (SP) no selamento superficial de um latossolo, Macedo et al. (2006a) trabalharam com a hipótese de que o selamento poderia estar associado ao sistema de preparo do solo, com aração e gradagem, seguida da passada da enxada rotativa para incorporação do lodo de esgoto, deixando o solo sem proteção contra os efeitos prejudiciais da chuva. Essa exposição do solo poderia estar favorecendo a atuação do fenômeno do selamento superficial, já que este é causado pelos processos de desagregação do solo pelo impacto direto das gotas de chuva, causando o salpicamento e posterior entupimento dos poros superficiais.

Macedo et al. (2006a) observaram que, à medida que se aumentam as doses de lodo, ocorre incremento na densidade do solo na superfície das amostras e uma tendência do lodo estar influenciando no incremento do selamento superficial, concluindo assim que o lodo de esgoto incorporado ao solo com enxada rotativa age como cimentante, facilitando o surgimento de crosta e aumentando sua espessura, com consequente interferência negativa na germinação de sementes.

Macedo et al. (2006b), objetivando analisar se as propriedades físicas do solo realmente podem sofrer alterações favoráveis ou não após a incorporação de lodo de esgoto, realizaram o experimento com o uso de adubação mineral e diferentes tratamentos com lodo de esgoto (doses com 1, 2, 4 e 8 vezes a concentração de nitrogênio disponibilizada pela adubação mineral) de ETE Barueri e Franca (SP) durante o período de quatro safras do milho.

Os resultados da densidade do solo mostraram que a aplicação de lodos não promoveu alterações significativas neste atributo físico, fato esse que pode ser entendido como prejudicial e causado tanto pelo preparo do solo com aração e gradagem, quanto pela incorporação do lodo com enxada rotativa, que são métodos que neutralizam possíveis benefícios oriundos da aplicação de matéria orgânica do lodo. Por outro lado, verificou-se também uma tendência de incremento, tanto da macroporosidade, quanto da porosidade total e das taxas de infiltração de água no solo com o aumento da dose de lodo. Da mesma forma que em Macedo et al. (2006a),

Macedo et al. (2006b) constataram que a exposição da superfície de solo com lodo incorporado e chuva levou à formação de crosta, com consequente prejuízo à germinação de sementes.

#### **5.4. Viabilidade econômica do lodo: custos de transporte e aplicação**

Silva, Resck e Sharma (2002a) e Trannin, Siqueira e Moreira (2005) mostraram que a viabilidade do lodo deve ser avaliada também pelos custos de transporte a partir da fonte geradora e pelos custos de aplicação, além das suas características físico-químicas, de forma a gerar a melhor relação benefício-custo com seu uso como fertilizante agrícola.

Trannin, Siqueira e Moreira (2005) avaliaram a viabilidade econômica de um lodo de esgoto de indústria de fibras e resinas PET (polietileno tereftalato), obtido da ETE da Rhodia-ster S.A em Poços de Caldas (MG). No experimento foram utilizados os seguintes tratamentos: controle (sem adubação); adubação mineral e doses de 6, 12, 18 e 24 t/ha de lodo, sendo que as doses do resíduo corresponderam, aproximadamente, a 0; 0,5; 1 e 2 vezes a quantidade de nitrogênio aplicada no tratamento com adubação mineral. O lodo melhorou a fertilidade do solo (refletida no aumento dos teores de nitrogênio, fósforo, cobre, ferro e zinco), o estado nutricional e a produtividade do milho, superando em 21% a adubação mineral e em 74% o controle. Mesmo na maior dose aplicada, os teores de nutrientes, sódio e metais pesados no lodo não causaram fitotoxicidade.

Em relação à análise de custos e benefícios, o estudo de Trannin, Siqueira e Moreira (2005) indicou que o aumento da produtividade do milho e a diminuição dos custos com fertilizantes minerais, em resposta ao aumento das doses de lodo, refletiram em acréscimos na receita líquida parcial e lucros em relação à adubação mineral. Mesmo com a aplicação da menor dose de lodo, houve lucro de R\$ 145,00/ha comparado à adubação mineral, mas o lucro máximo de R\$ 1.269,00/ha foi alcançado com a aplicação da maior dose de 24 t/ha. No entanto, é preciso considerar os custos com o transporte e aplicação desse resíduo no solo. Apesar de ser fornecido gratuitamente, os usuários pagam pelo transporte do lodo, o qual, pelo seu elevado

conteúdo de água, só é viável até determinada distância. Considerando-se o custo de transporte, a aplicação deste lodo foi economicamente viável numa distância de até 66 km da fonte geradora. A equivalência em produtividade à adubação mineral (7,89 t/ha) foi obtida com 10 t/ha de lodo.

Silva, Resck e Sharma (2002b) também estudaram a viabilidade econômica da aplicação de lodo de esgoto de ETE de Brasília (GO) na produção de milho com base nos resultados obtidos por Silva, Resck e Sharma (2002a), chegando à conclusão de que o transporte só é vantajoso para uma distância máxima de 122 km a partir da ETE. A vantagem inicial do lodo, enquanto fertilizante, é limitada pela distância de transporte do material entre a usina fornecedora e o local de aplicação. Além disso, o elevado conteúdo de água no lodo que é oferecido aos produtores requer que altas doses sejam aplicadas para obter equivalência aos fertilizantes comerciais, gerando um alto custo para o produtor no transporte de grande volume de material, podendo limitar sua utilização. Porém, a redução do conteúdo de água do lodo pode contribuir para expandir a área de abrangência de seu uso para três vezes a área de abrangência de seu uso (365 km no caso do estudo), embora os processos de desidratação por secagem, prensagem ou outro qualquer consomem energia e, portanto, criaria um custo adicional ao produto, o que poderia inviabilizar o fornecimento gratuito do lodo. Por fim, a aplicação de 54 t/ha de lodo úmido apresentou a melhor relação benefício/custo, comparada às demais aplicações e às adubações com fertilizantes minerais.

### **5.5. Taxas de mineralização**

Boeira (2009) e Moretti, Bertoncini e Abreu-Junior (2013) verificaram taxas de mineralização maiores que as da norma, o que indica que as doses de lodo sugeridas pela legislação foram muito superiores do que a demanda das culturas verificadas em campo. Dessa forma, os autores sugerem a definição de taxa especificamente para cada resíduo, uma vez que eles possuem composições diferentes. É importante lembrar que o possível efeito residual do nitrogênio no solo e a capacidade de retenção pelas plantas devem ser levados em consideração para determinar a dose ideal de aplicações

sucessivas de lodo em uma mesma área, visando à redução dos riscos de lixiviação do nitrato (BOEIRA; MAXIMILIANO, 2006).

Boeira (2009) estimou o potencial de lixiviação de nitrogênio mineral de um latossolo tratado com doses de lodo de esgoto oriundos de ETE de Franca (SP) e Barueri (SP) e determinou a fração de mineralização do nitrogênio orgânico dos resíduos. Os tratamentos avaliados foram: testemunha e doses de lodo com 1, 2, 4 e 8 vezes a recomendação de adubação nitrogenada para a cultura (100 kg de N/ha).

Boeira (2009) verificou que houve aumento da quantidade de nitrogênio lixiviado quando se aumentaram as doses de lodo, sendo que o lodo de Barueri causou maior lixiviação do que o de Franca, evidenciando o risco potencial de poluição ambiental por nitrato ao se utilizarem doses superiores às recomendadas. Considerando-se os valores estimados da fração de mineralização, verificaram-se taxas de 26% e 43% em lodos anaeróbios provenientes das ETEs de Franca e Barueri, respectivamente, diferente do valor estipulado na norma brasileira para uso agrícola de lodo de esgoto anaeróbio (20%), indicando que a taxa de mineralização do nitrogênio deve ser determinada especificamente para cada resíduo no solo onde será aplicado, de forma a garantir uma dose de aplicação ambientalmente segura.

A determinação da taxa de mineralização de nitrogênio em solos tratados com resíduos é fundamental para definir as doses a serem aplicadas, fornecendo nitrogênio às plantas na época adequada, sem perdas do elemento por lixiviação. Dessa forma, assim como em Boeira (2009), Moretti, Bertocini e Abreu-Junior (2013) avaliaram a fração de mineralização do lodo de esgoto da ETE de Franca (SP) aplicado em um nitossolo cultivado com cana de açúcar em doses de 3,6; 7,2 e 14,4 t/ha. De modo geral, os resultados mostraram que as doses de lodo de esgoto aplicadas ao solo que atenderam à demanda da cana de açúcar foram muito menores que aquelas sugeridas pela legislação vigente, indicando que essa legislação pode estar superestimando as taxas de aplicação de lodo, sugerindo revisões na legislação que regulamenta o uso de lodo de esgoto em solos agrícolas.

## 5.6. Relação entre tempo de estudo e observação dos efeitos de lodo em solo

Embora a maioria dos experimentos tenha sido realizada em um curto período de tempo, Filizola et al. (2006) e Backes et al. (2009) salientam que ainda assim foi possível observar o efeito gerado pela aplicação do lodo de esgoto em solo, sendo que a continuidade dos experimentos daria maior embasamento para os resultados das pesquisas.

Filizola et al. (2006), buscando discutir os efeitos do lodo de esgoto de ETE Barueri e Franca (SP) em latossolo na cultura do milho por meio da avaliação da estabilidade dos agregados, argila dispersa em água e carbono orgânico, verificaram que houve redução da argila dispersa em água. A dispersão da argila no solo é resultante de uma instabilidade estrutural ou problemas de manejo, assim os resultados do trabalho indicam melhoria na qualidade do solo apesar do pouco tempo de utilização do lodo.

Objetivando avaliar o efeito da aplicação de lodo de esgoto originado na ETE de Mogi das Cruzes (SP), acrescido ou não de adubação nitrogenada, no desenvolvimento inicial de plantas de mamoneira em latossolo, Backes et al. (2009) obtiveram como resultado o aumento na altura de plantas e massa de matéria seca, além de efeito positivo nas concentrações de nitrogênio, potássio, magnésio, enxofre e dos micronutrientes cobre, ferro, manganês e zinco nas plantas com a aplicação do lodo de esgoto. As cinco doses de lodo (0, 4, 8, 16 e 32 t/ha), acrescido ou não de adubação nitrogenada (15 kg de N/ha) foram calculadas de acordo com o teor de nitrogênio presente no lodo, o teor de nitrogênio necessário para a cultura e a taxa de mineralização desse lodo.

Apesar de Backes et al. (2009) terem obtido resultado positivo no incremento dos teores de potássio mesmo com concentrações bastante baixas desse nutriente no lodo, foi verificado que o potássio foi quase exaurido do solo. Frequentemente a complementação potássica é recomendada como imprescindível para a obtenção de boas produções, uma vez que o lodo de esgoto é deficiente em potássio por causa da alta solubilidade desse elemento em água (SILVA et al., 2001). Embora a aplicação do lodo tenha disponibilizado nutrientes para o desenvolvimento inicial da mamoneira, não houve uma alteração dos teores dos mesmos em solo. Tal fato pode ser justificado pelo

curto período em que o experimento foi analisado, podendo não ter havido tempo suficiente para uma boa mineralização do material de forma a disponibilizar maiores quantidades de nutrientes capazes de alterar o teor no solo (BACKES et al., 2009).

### **5.7. Comparação entre o lodo de esgoto e a adubação mineral na produtividade das culturas**

Nogueira et al. (2008), Silva et al. (2008) e Ribeirinho et al. (2012) observaram que a aplicação do lodo de esgoto foi tão efetiva quanto à adubação mineral na produtividade das culturas, levando a concluir que o uso de lodo de esgoto é eficiente na substituição total ou parcial da adubação mineral.

De forma a estudar os teores de cádmio, cromo, chumbo e zinco em latossolo tratado com lodo de esgoto por nove anos consecutivos e seus efeitos na produção de matéria seca e na produtividade de grãos de milho, Nogueira et al. (2008) realizaram experimento com tratamentos correspondentes a doses acumuladas de nove anos consecutivos de lodo de esgoto (45, 90 e 127,5 t/ha) oriundo da ETE de Barueri (SP) e um tratamento testemunha que recebeu fertilização mineral.

Nogueira et al. (2008) observaram que as doses de lodo de esgoto aplicadas por nove anos consecutivos não influenciaram os teores de cádmio, cromo e chumbo no solo, entretanto, promoveram o incremento nos teores de zinco no solo. É importante lembrar que o acúmulo de metais pesados no solo, em razão de aplicações sucessivas de lodo de esgoto, é um dos aspectos que mais causam preocupação com relação à segurança ambiental, necessária para a viabilização do uso desse resíduo na agricultura. Além disso, concluíram também que a aplicação sucessiva do lodo foi tão efetiva quanto à adubação mineral na produção de matéria seca e de grãos de milho.

Silva et al. (2008) aplicaram lodo de esgoto seco e úmido oriundo da ETE de Barueri (SP) em diferentes doses (5, 10, 20 e 30 t/ha) em latossolo de baixa fertilidade para verificar o efeito sobre o crescimento e produção de biomassa lenhosa do eucalipto, obtendo resultados semelhantes em relação ao volume de madeira entre o tratamento com lodo e a adubação mineral. Além disso, os resultados dos tratamentos com lodo

úmido e seco não apresentaram diferença, sendo que as doses de lodo variando entre 5 e 10 t/ha foram consideradas as mais adequadas, uma vez que, além de estimular o crescimento dos eucaliptos, têm menor custo de aplicação.

Ribeirinho et al. (2012) avaliaram a produtividade e nutrição mineral do girassol, além da fertilidade de um latossolo adubado com lodo de esgoto proveniente da ETE de Barueri (SP) aplicado em doses de 5, 10 e 20 t/ha, em comparação à adubação mineral. Os resultados levaram a concluir que a produtividade de sementes do girassol adubado com o lodo, em todas as doses, foi equivalente à adubação mineral, e os teores foliares situaram-se na faixa adequada, tanto para macro quanto para micronutrientes. O uso de lodo de esgoto, com suplementação potássica, mostrou-se eficiente na substituição total ou parcial da adubação mineral, sem prejudicar a produtividade da cultura do girassol. Desta forma, o uso agrícola do lodo de esgoto pode gerar economia e uma destinação sustentável para este resíduo.

## **5.8. Levantamento das áreas estudadas**

A Tabela 2 sintetiza a quantidade de estudos levantados para o presente trabalho sobre a disposição de lodo de ETE em solo encontrados em diferentes regiões do Brasil levando em consideração a origem do lodo de ETE usado em cada experimento. É possível verificar que há predominância de experimentos realizados utilizando lodo proveniente de ETE da região Sudeste do país (35 casos), em especial do Estado de São Paulo (32 casos), com poucas ocorrências no Nordeste (dois casos), apenas uma no Centro-Oeste e nenhuma em outras regiões do país.

**Tabela 2 - Número de estudos encontrados por região e cidades do Brasil considerando a ETE que deu origem ao lodo usado em cada experimento**

<b>Região</b>	<b>Cidade</b>	<b>Nº de estudos</b>
Sudeste	<u>São Paulo</u>	
	Barueri	17
	Franca	10
	Jundiaí	2
	Araçatuba	1
	Mogi das Cruzes	1
	Suzano	1
	<u>Espírito Santo</u>	
	Jerônimo Monteiro	2
	<u>Minas Gerais</u>	
Poços de Caldas	1	
<b>Total</b>		35
Nordeste	<u>Pernambuco</u>	
	Recife	1
	<u>Paraíba</u>	
Campina Grande	1	
<b>Total</b>		2
Centro-Oeste	<u>Goiás</u>	
	Brasília	1
<b>Total</b>		1



## 6. CONCLUSÃO

Diante do exposto ao longo do trabalho, pode-se dizer que o reuso do lodo de esgoto com a disposição em solos atende aos requisitos da busca por uma alternativa que traga vantagens agronômicas, ambientais e econômicas, além de ser uma alternativa ambiental e socialmente saudável se devidamente atendidas as legislações que tratam do tema.

Porém, as legislações e normas que regulamentam a utilização agrícola no Brasil são embasadas em normas de outros países, ou seja, as condições edafo-climáticas brasileiras não foram consideradas na sua elaboração, o que leva a pensar na eficácia destas normas em um cenário altamente divergente em recursos naturais.

Os resultados expostos ao longo do trabalho, salientados pela evidenciada escassez de estudos pelo Brasil que abranjam diversas condições edafo-climáticas nas diferentes regiões do país, embasam a necessidade de se realizarem mais estudos com a aplicação de lodo de esgoto em solos brasileiros para que possa haver uma revisão e atualização das legislações de forma compatível com as características da região, garantindo uma atividade segura e benéfica ao ambiente e à sociedade.

Este estudo vem contribuir no presente cenário de escassez de trabalhos científicos sobre a disposição de lodo de ETE em solo no Brasil, reunindo dados produzidos no país com o uso dessa alternativa de disposição final, evidenciando as implicações encontradas pelos autores.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, C. A.; MATTIAZZO, M. E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biossólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 58, p.59-72, 2000.
- ANDREOLI, C. V. et al. **Uso e Manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro : Sanepar/Prosab/Finep, 1999.
- ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento**: processamento, reciclagem e disposição final. Rio de Janeiro : RiMa, ABES, 2001.
- ARAUJO, F.F.; GIL, F. C.; TIRITAN, C. S. Lodo de esgoto na fertilidade do solo, na nutrição de *Brachiaria decumbens* e na atividade da desidrogenase. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 1, p. 1-6, 2009.
- BACKES, C. et al. Efeito do lodo de esgoto e nitrogênio na nutrição e desenvolvimento inicial da mamoneira. **Biosciência Journal**, Uberlândia, v. 25, n. 1, p. 90-98, 2009.
- BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J. Uso agrícola do biossólido: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 27, n. 04, p. 565-580, 2006.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto**: impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna. Embrapa Meio Ambiente, 2006a.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. Disposição de lodo de esgoto em solo agrícola. In: \_\_\_\_\_. **Lodo de esgoto**: impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006b. Cap.2, p. 25-35.
- BEZERRA, L. J. D. et al. Análise de crescimento do algodão colorido sob os efeitos da aplicação de água residuária e biossólidos. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, p.333-338, 2005.
- BOEIRA, R. C. Lixiviação de nitrogênio em latossolo incubado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p.947-958, 2009.
- BOEIRA, R. C.; MAXIMILIANO, V. C. B. Dinâmica da mineralização do nitrogênio em lodos de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Ed.). **Lodo de esgoto**: impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna: Embrapa, 2006. Cap. 7, p. 125-136.
- BRASIL. Ministério das Relações Exteriores. Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Agenda 21. **Diário Oficial da União Brasília**, Brasília, 02 ago. 1994.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agenda 21 brasileira: resultado da consulta nacional. Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e da Agenda 21 Nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2. ed. 2004.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n. 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de

esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 ago. 2006.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 mai. 2011.

CAMPOS, F. S.; ALVES, M. C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 32, p. 1389-1397, 2008.

CHAGAS, W. F. **Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienizado para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no Estado do Rio de Janeiro**. 1999. 102 f. Dissertação (Pós-graduação em Ciências em Saúde Pública) – Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, Curitiba, 2000.

DYNIA, J. F.; BOEIRA, R. C.; SOUZA, M. D. Nitrato no perfil de um latossolo vermelho distroférico cultivado com milho sob aplicações sequenciais de lodo de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Ed.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa, 2006. Cap. 5, p. 79-89.

FARIA, R. L. de. O uso do lodo de esgoto na agricultura: impactos ambientais e restrições técnicas. **Revista Complexus**, ano 2, n. 3, p. 102-122, 2011.

FILIZOLA, H. F. et al. Aspectos físicos de um solo tratado com lodo de esgoto: estabilidade de agregados e argila dispersa em água. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Ed.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa, 2006. Cap. 8, p. 137-147.

GALDOS, M.V.; DE MARIA, I. C.; CAMARGO, O. A. Atributos químicos e produção de milho em um Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.569-577, 2004.

GARCIA, G. O. et al. Análise nutricional de mudas de eucalipto submetidas à aplicação de lodo de esgoto doméstico. **Revista Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 275-290, 2009a.

GARCIA, G. O. et al. Características químicas de um solo degradado após aplicação de lodo de esgoto doméstico. **Revista verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 4, n.2, p. 1-12, 2009b.

GUEDES, M. C. et al. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.30, p.267-280, 2006.

LIRA, A. C. S.; GUEDES, M. C.; SCHALCH, V. Reciclagem de lodo de esgoto em plantação de eucalipto: carbono e nitrogênio. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 2, p. 207-216, 2008.

MACEDO, J. R. et al. Selamento superficial em latossolo vermelho distroférico tratado com lodo de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Ed.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa, 2006a. Cap. 10, p. 165-191.

MACEDO, J. R. et al. Atributos Físicos e Hídricos em Solo Tratado com Lodo de Esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Ed.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa, 2006b. Cap. 11, p. 193-205.

MARQUES, M. O. et al. Teores de Cr, Ni, Pb e Zn em Argissolo Vermelho tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, n.1, 2007.

MORETTI, S. M. L.; BERTONCINI, E. I.; ABREU-JUNIOR, C. H. Aplicação do método de mineralização de nitrogênio com lixiviação para solo tratado com lodo de esgoto e composto orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p.622-631, 2013.

MUNHOZ, R. O.; BERTON, R. S. Disponibilidade do fósforo para o milho em solo que recebeu lodo de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Ed.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa, 2006. Cap. 6, p. 91-124.

NASCIMENTO, C. W. A. et al. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, n. 2, p. 385-392, 2004.

NOGUEIRA, T. A. R. et al. Cádmio, cromo, chumbo e zinco em plantas de milho e em latossolo, após nove aplicações anuais de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.32, p. 2195-2207, 2008.

PAIVA, A. V. et al. Crescimento de mudas de espécies arbóreas nativas, adubadas com diferentes doses de lodo de esgoto seco e com fertilização mineral. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p.499-511, 2009.

PIRES, A. M. M. Uso agrícola do lodo de esgoto: aspectos legais. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)**. Jaguariúna, 2006.

QUINTANA, N. R. G.; CARMO, M. S. do; MELO, W. J. de. Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. **Nucleus**, v.8, n.1, 2011.

RIBEIRINHO, V. S. et al. Fertilidade do solo, estado nutricional e produtividade de girassol, em função da aplicação de lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 166-173, 2012.

RIGO, M. M. et al. Destinação e reuso na agricultura do lodo de esgoto derivado do tratamento de águas residuárias domésticas no Brasil. **Gaia Scientia**, João Pessoa, v. 8, n. 1, p. 174-186, 2014.

ROCHA, J. H. T. et al. Composto de lodo de esgoto como substrato para mudas de eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 73, p. 27-36, 2013.

SILVA, C. A. et al. Dinâmica de metais pesados em latossolo adubado com lodo de esgoto e em plantas de milho. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Ed.). **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa, 2006. Cap. 4, p. 45-77.

SILVA, F. C. da et al. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.5, p. 831-840, 2001.

SILVA, F. C. et al. Impactos da aplicação de lodo de esgoto na cultura da cana-de-açúcar e no ambiente. **HOLOS Environment**, v.10, n.1, p. 62-82, 2010.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; SHARMA, R. D. Alternativa agronômica para o biossólido produzido no Distrito Federal. I – Efeito na produção de milho e na adição de metais pesados em latossolo no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 26, p. 487-495, 2002a.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; SHARMA, R. D. Alternativa agronômica para o biossólido produzido no Distrito Federal. II – Aspectos qualitativos, econômicos e práticos de seu uso. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 26, p. 497-503, 2002b.

SILVA, P. H. M. et al. Crescimento de *Eucalyptus grandis* tratado com diferentes doses de lodos de esgoto úmido e seco, condicionados com polímeros. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 79-88, 2008.

TRANNIN, I. C. B; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. de S. Avaliação agronômica de um biossólido industrial para a cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.261-269, 2005.