

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS**  
**AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**DISSERTAÇÃO**

**Uso de biossólido de lodo de esgoto em plantios de espécies  
da Mata Atlântica**

**Marcelo Vinícius da Silva**

**2017**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS  
AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**USO DE BIODISSÓLIDO DE LODO DE ESGOTO EM PLANTIOS DE  
ESPÉCIES DA MATA ATLÂNTICA**

**MARCELO VINÍCIUS DA SILVA**

*Sob a Orientação do Professor*  
**Guilherme Montandon Chaer**

*e Co-orientação do Professor*  
**Paulo Sérgio dos Santos Leles**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

Seropédica, RJ  
Agosto de 2017

S586u Silva, Marcelo Vinícius da, 1988 –  
Uso de biossólido de lodo de esgoto em plantios de espécies da Mata Atlântica / Marcelo Vinícius da Silva.  
- 2017.  
41 f.:il.

Orientador: Guilherme Montandon Chaer  
Coorientador: Paulo Sérgio dos Santos Leles.  
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Ciências Ambientais e Florestais, 2017.

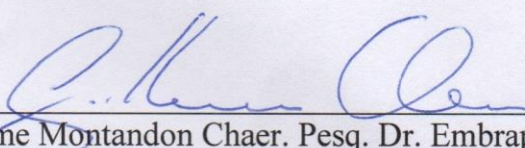
1. Bissólido. 2. Restauração Florestal. 3. Adubação Orgânica. I. Chaer, Guilherme Montandon, 1975-, Orient. II. Leles, Paulo Sérgio dos Santos, 1966-, Coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Ciências Ambientais e Florestais. IV. Título.

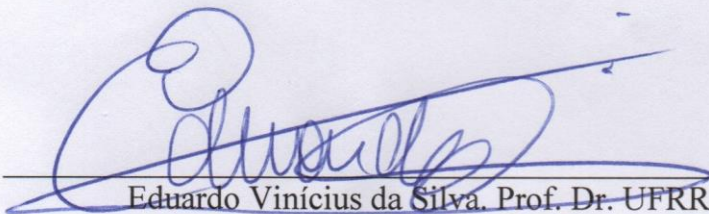
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
E FLORESTAIS**

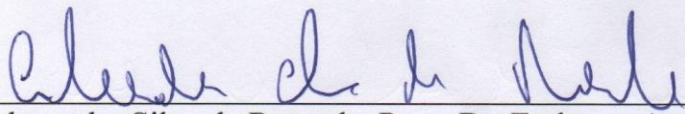
**MARCELO VINÍCIUS DA SILVA**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 02/06/2017

  
\_\_\_\_\_  
Guilherme Montandon Chaer. Pesq. Dr. Embrapa Agrobiologia  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Eduardo Vinícius da Silva. Prof. Dr. UFRRJ  
(Membro)

  
\_\_\_\_\_  
Alexander Silva de Resende. Pesq. Dr. Embrapa Agrobiologia  
(Membro)

## DEDICATÓRIA

*Dedico ao amor e a amizade, pois sem  
esses sentimentos a vida se torna  
monótona e sem sentido.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, pois proveu-me determinação e concedeu-me saúde para percorrer esse longo caminho até a conclusão de mais essa etapa na minha vida.

A minha família, em especial a minha mãe, exemplo de mulher na minha vida, pois além de ser mãe, é trabalhadora e guerreira. A você toda honra e orgulho de mais essa etapa concluída.

A minha namorada, Jéssica de Oliveira, por me escutar, apoiar e incentivar em todas as dificuldades encontradas no meu caminho, além de aturar meus momentos de estresse.

Aos amigos, os verdadeiros, sem os quais a vida seria mais monótona e menos interessante. Agradeço por todo apoio e companhia nos momentos de dificuldade.

Agradeço em especial ao meu orientador, Guilherme Montandon Chaer, por toda atenção dispensada para auxílio, apoio e orientação na elaboração dessa dissertação.

Ao meu amigo e co-orientador, Paulo Sergio dos Santos Leles, por todo auxílio na elaboração desse trabalho e por todo apoio profissional fora do meio acadêmico, meu muito obrigado.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por ter me proporcionado concluir a Graduação em Engenharia Florestal e agora o Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais. Agradeço eternamente por ter me proporcionado um ensino público, gratuito e de qualidade.

Agradeço a Embrapa Agrobiologia por me proporcionar todo apoio técnico e laboratorial para que essa dissertação pudesse ser concluída. Agradeço em especial os técnicos do Laboratório de Leguminosas Florestais, Fernando e Adriana, o analista do mesmo laboratório, Marcelo, além de todo o pessoal do Campo Experimental, que foram fundamentais nas manutenções e coletas de dados dos experimentos de campo.

Aos estagiários do Laboratório de Pesquisas e Estudos em Reflorestamento (LAPER), que foram fundamentais na implantação e coleta de dados nos experimentos de campo.

A CAPES, pela concessão da bolsa de auxílio financeiro de pesquisa.

A Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul - AGEVAP, pelo apoio financeiro concedido para elaboração desse trabalho.

## RESUMO

SILVA, Marcelo Vinícius. **Uso de biossólido de lodo de esgoto em plantios de espécies da Mata Atlântica**. 2017. 41f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

O lodo de esgoto tratado, denominado biossólido, contém altos teores de macronutrientes e matéria orgânica sendo, potencialmente, um ótimo insumo para utilização agrícola e florestal. Entretanto, estudos sobre a resposta de crescimento de espécies arbóreas florestais nativas à adubação com biossólido ainda são muito incipientes. O objetivo desse estudo foi avaliar os efeitos proporcionados pela aplicação de biossólido de lodo de esgoto sobre o crescimento de sete espécies arbóreas da Mata Atlântica, comumente utilizadas em plantios de restauração. Em um experimento de campo em Seropédica, RJ, foi avaliado o efeito de quatro doses de biossólido (0, 2, 4 e 8 L por cova de plantio) e um tratamento com fertilização mineral sobre o crescimento de sete espécies arbóreas. Ao longo de 19 meses foi monitorado o crescimento (altura e diâmetro à altura do solo – DNS) e a sobrevivência das espécies *Schinus terebinthifolius* Radd. (aroeira), *Lafoensia glyptocarpa* KOEHNE (mirindiba), *Inga laurina* (Sw.) Willd. (ingá-laurina), *Senna multijuga* (Rich.) (pau-cigarra), *Genipa americana* (Vell.) Brenan (jenipapo). Em um segundo plantio, sob os mesmos tratamentos, foi monitorado por 9 meses as espécies *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub (farinha-seca) e *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong (orelha-de-negro). Ao final do período de monitoramento, foi avaliado também o diâmetro de copa e os teores foliares de macronutrientes. A dose de até 4 L de biossólido não comprometeu a sobrevivência das plantas em campo. Porém, sob o tratamento com fertilizante mineral houve mortalidade de todas as plantas de *S. multijuga*, 80% de *I. laurina* e 67% das plantas de *L. glyptocarpa*, provavelmente em razão do efeito dos sais do fertilizante sobre o potencial hídrico do solo conjugado à ocorrência de um período de estiagem após o plantio. O aumento da dose de biossólido correspondeu a um aumento linear do crescimento do DNS de *S. terebinthifolius*, e do crescimento em altura, DNS e diâmetro de copa de *P. dubium*. Entretanto, a aplicação da dose de 8 L de biossólido reduziu em até 50% o crescimento de *S. multijuga*. As espécies *I. laurina*, *G. americana* e *E. contortisiliquum* não apresentaram resposta à aplicação de biossólido. A adubação mineral reduziu significativamente o crescimento de *S. terebinthifolius* ( $p < 0,05$ ) e tendência similar foi observada para *G. americana*, *L. glyptocarpa* e *P. dubium* ( $p < 0,17$ ). Entretanto, esse mesmo tratamento aumentou em 70% o crescimento em altura de *E. contortisiliquum* em relação ao controle não adubado. Em geral, os tratamentos não alteraram significativamente os teores de macronutrientes foliares das espécies avaliadas. Uma clara exceção foi o aumento do teor de Ca em plantas de *L. glyptocarpa* que receberam biossólido, e o aumento do teor de N em *P. dubium* tratado com adubação mineral. Conclui-se que as diferentes espécies florestais nativas apresentam respostas distintas à aplicação de biossólido. A dose de 4 L/cova de biossólido foi a única que não teve efeito negativo ou promoveu o crescimento das espécies arbóreas da Mata Atlântica avaliadas. Recomenda-se que estudos similares sejam efetuados em outros tipos de solo com outras espécies de modo refinar a recomendação do uso do biossólido em plantios de restauração florestal. Por fim, sugere-se cautela no uso de fertilizantes minerais para plantios com espécies nativas, pois esta prática pode resultar em mortalidade ou retardar o crescimento de algumas espécies.

**Palavras-chave:** Biossólido; restauração florestal; adubação orgânica.

## ABSTRACT

SILVA, Marcelo Vinícius. **Use of sewage sludge biosolids in plantation of Atlantic Forest species.** 2017. 41f. Dissertation (Master in Forest and Environmental Sciences). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

Treated sewage sludge, called biosolid, contains high levels of macronutrients and organic matter, potentially being a great input for agricultural and forestry use. However, studies on the growth response of native forest tree species to biosolids fertilization are still very incipient. The objective of this study was to evaluate the effects of sewage sludge biosolids on the growth of seven Atlantic Forest tree species, commonly used in restoration plantations. In a field experiment in Seropédica, RJ, was evaluated the effect of four doses of biosolids (0, 2, 4 and 8 L per planting pit) and a treatment with mineral fertilization on the growth of seven tree species. During 19 months, growth (height and diameter at soil height - DNS) and survival of the species *Schinus terebinthifolius* Radd were monitored. (Aroeira), *Lafoensia glyptocarpa* KOEHNE (mirindiba), *Inga laurina* (Sw.) Willd. (Inglá-laurine), *Senna multijuga* (Rich.) (Pau-cigarra), *Genipa americana* (Vell.) Brenan (genipapo). In a second planting, under the same treatments, the species *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub (dry flour) and *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong (black ear) were monitored for 9 months. At the end of the monitoring period, the crown diameter and macronutrient leaf contents were also evaluated. The dose of up to 4 L of biosolid did not compromise the survival of the plants in the field. However, under the mineral fertilizer treatment, all plants of *S. multijuga*, 80% of *I. laurina* and 67% of plants of *L. glyptocarpa*, probably due to the effect of fertilizer salts on soil water potential conjugated to the occurrence of a drought period after planting. The increase of the biosolid dose corresponded to a linear increase of the growth of the DNS of *S. terebinthifolius*, and of the growth in height, DNS and cup diameter of *P. dubium*. However, application of the 8 L dose of biosolids reduced up to 50% growth of *S. multijuga*. The species *I. laurina*, *G. americana* and *E. contortisiliquum* showed no response to biosolid application. Mineral fertilization significantly reduced the growth of *S. terebinthifolius* ( $p < 0.05$ ) and a similar trend was observed for *G. americana*, *L. glyptocarpa* and *P. dubium* ( $p < 0.17$ ). However, this same treatment increased the height growth of *E. contortisiliquum* by 70% in relation to the non-fertilized control. In general, the treatments did not significantly alter the macronutrient contents of the evaluated species. A clear exception was the increase of the Ca content in plants of *L. glyptocarpa* that received biosolids, and the increase of the N content in *P. dubium* treated with mineral fertilization. It is concluded that the different native forest species present different responses to the biosolid application. The dose of 4 L of biosolid was the only one that had no negative effect or promoted the growth of the Atlantic Forest tree species evaluated. It is recommended that similar studies be carried out on other soil types with other species in order to refine the recommendation of the use of biosolids in forest restoration plantations. Finally, caution is suggested in the use of mineral fertilizers for plantations with native species, as this practice may result in mortality or slow the growth of some species.

**Keywords:** Biosolid; forest restoration; organic fertilization.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Dados climáticos de abril de 2015 a novembro de 2016 obtidos da estação meteorológica Ecologia Agrícola, Seropédica, RJ. (Fonte: INMET, 2017). Números sobre as barras indicam quantidade de dias com precipitações superiores a 1mm. ....10
- Figura 2:** Fluxograma da formação de biossólido de lodo de esgoto, efluente tratado e biogás na ETIG. Adaptado de Bielschowsky (2014). .....11
- Figura 3:** Incremento cumulativo em altura de quatro espécies ao longo de 19 meses de período de crescimento, sob diferentes doses de biossólido de lodo de esgoto (0, 2, 4 e 8 L) e controle com fertilização mineral. ....15
- Figura 4:** Incremento cumulativo em altura de três espécies ao longo de 9 meses de período de crescimento, sob diferentes doses de biossólido de lodo de esgoto (0, 2, 4 e 8 L) e controle com fertilização mineral.....16

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1:</b> Limites máximos de concentração de metais pesados definidos pela Resolução CONAMA 375/2006. ....   | 4  |
| <b>Tabela 2:</b> Frequência de monitoramento das características do lodo de esgoto ou produto derivado utilizado na agricultura ao ano, segundo a Resolução CONAMA 375/2006. ....   | 4  |
| <b>Tabela 3:</b> Classes de lodo de esgoto ou produto derivado, de acordo com a Resolução CONAMA 375/2006. ....   | 4  |
| <b>Tabela 4:</b> Limites de carga máxima total acumulada no solo em função da aplicação de substâncias inorgânicas oriundas do lodo de esgoto ou produto derivado, de acordo com a Resolução CONAMA 375/2006. ....  | 5  |
| <b>Tabela 5:</b> Características químicas do Planossolo Háplico do local de instalação do experimento no Campo Experimental da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ....   | 10 |
| <b>Tabela 6:</b> Análise de nutrientes totais (digestão de tecidos) do biossólido de lodo de esgoto da ETIG, RJ. ....   | 12 |
| <b>Tabela 7:</b> Percentual de sobrevivência de sete espécies florestais da Mata Atlântica aos 9 meses ( <i>P. dubium</i> , <i>G. americana</i> e <i>E. contortisiliquum</i> ) e aos 19 meses ( <i>S. terebinthifolius</i> , <i>I. laurina</i> , <i>L. glyptocarpa</i> e <i>S. multijuga</i> ) após o plantio, em função da aplicação de doses de biossólido de lodo de esgoto ou adubação com fertilizante mineral (FM). ....  | 14 |
| <b>Tabela 8:</b> Taxas de incremento em altura e diâmetro ao nível do solo (DNS) e área de copa de espécies florestais do bioma Mata Atlântica adubadas com 0, 2, 4, ou 8 L de biossólido de lodo de esgoto ou com fertilizantes minerais (FM). Modelos de regressão linear (MRL) para estimar a variável de crescimento em função das doses de biossólido são apresentados para cada espécie, quando significativos. Os asteriscos seguidos das médias indicam o nível de significância da comparação par a par entre o tratamento controle (0 L) e cada nível de adubação com biossólido ou fertilizante mineral. ....                            | 17 |
| <b>Tabela 9:</b> Teor de macronutrientes foliares aos 19 meses para as espécies <i>S. terebinthifolius</i> , <i>I. laurina</i> , <i>L. glyptocarpa</i> e <i>S. multijuga</i> e, aos 9 meses, para as espécies <i>P. dubium</i> , <i>G. americana</i> e <i>E. contortisiliquum</i> . Modelos de regressão linear (MRL) para estimar o teor de nutrientes foliar em função das doses de biossólido são apresentados para cada espécie quando significativos. Os asteriscos seguidos das médias indicam o nível de significância da comparação entre o tratamento controle (0 L) e cada nível de adubação com biossólido ou fertilizante mineral. .... | 19 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS.....</b>   | <b>2</b>  |
| 2.1. Objetivo geral .....  | 2         |
| 2.2. Objetivo específico.....  | 2         |
| <b>3. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>  | <b>3</b>  |
| 3.1. Lodo de esgoto .....  | 3         |
| 3.1.1. Caracterização e panorama mundial de produção.....  | 3         |
| 3.1.2. Panorama legal no âmbito federal: Resolução CONAMA n° 375/2006 e seus pontos pertinentes..... | 3         |
| 3.1.3. Produção do lodo de esgoto e sua classificação de acordo com a origem .....                   | 6         |
| 3.1.4. Etapas do tratamento do lodo de esgoto e a transformação para biossólido .....                | 6         |
| 3.1.5. Destinação final do biossólido de lodo de esgoto .....  | 7         |
| 3.2. Influência da aplicação de biossólido de lodo de esgoto.....                                    | 7         |
| 3.2.1. Características físicas, químicas e biológicas do solo.....                                   | 7         |
| 3.2.2. Biossólido de lodo de esgoto no meio florestal.....   | 8         |
| <b>4. MATERIAL &amp; MÉTODOS .....</b>   | <b>10</b> |
| 4.1. Caracterização da área experimental .....   | 10        |
| 4.2. Formação de biossólido de lodo de esgoto na ETE Ilha do Governador .....                        | 11        |
| 4.3. Montagem do experimento.....  | 11        |
| 4.4. Avaliações .....  | 12        |
| 4.5. Análise dos dados .....   | 13        |
| <b>5. RESULTADOS.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>6. DISCUSSÃO.....</b>   | <b>21</b> |
| <b>7. CONCLUSÕES .....</b>   | <b>24</b> |
| <b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>25</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, como forma de atender a legislação ambiental, os estados e municípios tem acelerado o processo de implantação de estações de tratamento de esgotos (ETE), visto que somente 40,8% de todo o esgoto produzido no país recebe tratamento (SNIS, 2016). Por este motivo, é esperado aumento considerável na produção do lodo de esgoto urbano e do produto gerado após seu tratamento para disposição final, o biossólido. Atualmente, a grande parte do biossólido gerado nos grandes centros urbanos possuem como destino final os aterros sanitários. Entretanto, o biossólido contém altos teores de nutrientes e matéria orgânica que podem ser aproveitados por espécies vegetais sendo, potencialmente, um ótimo insumo para utilização agrícola e florestal (ANDREOLI et al., 1999; GUEDES et al., 2006; CALDEIRA et al., 2012). Para o uso florestal, adiciona-se a vantagem do produto não ser de consumo direto do ser humano (CAMPOS; ALVES, 2008), fato que reduz o risco de contaminação biológica ou de metais pesados eventualmente presentes no biossólido.

Em países desenvolvidos, o biossólido já vem sendo utilizado em maior escala na agricultura e em plantios florestais como fonte de matéria orgânica, macro e micronutrientes e também como condicionador de solos pobres e desestruturados (Paiva et al., 2009). No Brasil, o uso é ainda muito restrito, principalmente por falta de conhecimento sobre a segurança química e biológica do biossólido produzido nas estações de tratamento de esgoto (ETEs), quanto pela falta de políticas que determinem padrões de produção do biossólido e que incentivem o seu uso no meio rural.

A Resolução 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (CONAMA, 2006) definiu critérios e procedimentos para o uso agrícola e florestal de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, no caso, o biossólido de lodo de esgoto. No entanto, a resolução apenas determina as cargas máximas acumuladas para substâncias inorgânicas, não definindo doses recomendadas para plantios agrícolas e florestais.

Estudos sobre o potencial de utilização do biossólido na agricultura remontam da década de 80 (BETTIOL; CARVALHO, 1982). Desde então tem sido estudada a aplicação do biossólido com a intenção de obter melhorias no solo (COLODRO; SPINDOLA, 2006; COLODRO et al., 2007; MARIA et al., 2010; MAIO et al., 2011) e ganhos em desenvolvimento de espécies agrônômicas e florestais como a cana-de-açúcar (SILVA et al., 2001), o milho (SIMONETE et al., 2003) e o eucalipto (ROCHA et al., 2004). Poucos estudos, entretanto, avaliaram o uso de biossólido em plantios de espécies arbóreas nativas utilizadas em plantios de restauração florestal. Silva & Pinto (2010) e Lima Filho (2015) são exemplos dos poucos autores que estudaram o efeito da aplicação do biossólido de lodo de esgoto sobre o crescimento de espécies nativas para restauração florestal, seja como adubação de plantio, seja como adubação de cobertura. Apesar dos poucos trabalhos com o biossólido na restauração florestal com espécies nativas, nestes trabalhos foi possível observar ganhos em crescimento das espécies estudadas, mostrando assim o potencial de utilização do biossólido como insumo alternativo para plantios de restauração florestal.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. *Objetivo geral***

Avaliar o potencial de uso do biossólido de lodo de esgoto como adubação de plantio para promover o crescimento de espécies nativas da Mata Atlântica.

### **2.2. *Objetivo específico***

Comparar o efeito da fertilização mineral com a adubação com doses crescentes de biossólido de lodo de esgoto sobre o crescimento de espécies da Mata Atlântica em Planossolo Háptico e definir a dosagem adequada de biossólido aplicado na cova de plantio.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. *Lodo de esgoto*

##### 3.1.1. *Caracterização e panorama mundial de produção*

Após o governo implantar a Política Nacional de Resíduos Sólidos sob a lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010, a qual define dentre os seus objetivos em seu artigo 7º a “proteção da saúde pública e da qualidade ambiental” e a “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010), o olhar sobre o lodo de esgoto e seu tratamento tornou-se mais importante. Nesse sentido, a Resolução nº 601 de 25 de maio de 2015, da Agência Nacional de Águas (ANA), ressalta a importância da redução dos níveis de poluição hídrica nas bacias hidrográficas do País, o que é reforçado pelo investimento de 20 milhões pelo Programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas (ALVES, 2015).

Andreoli (1999) cita que as ETEs recebem diariamente esgotos, que em sua maioria, apresentam uma composição média com 99% de água e 1% de sólidos, deste último percentual, 70% são compostos orgânicos (proteína, carboidratos, gorduras etc.) 30% são inorgânicos (areia, sais, metais etc.).

O lodo de esgoto é definido pela Norma Brasileira (NBR) nº 12.209/2011 como suspensão aquosa de componentes minerais e orgânicos separados no sistema de tratamento de esgotos. Bielschowsky (2014) define o lodo de esgoto como sendo uma suspensão de partículas sólidas separadas do meio líquido durante o processo de tratamento da fase líquida no sistema de tratamento de esgoto.

A composição do lodo de esgoto apresenta alto teor de matéria orgânica e nutrientes e, dependendo do tipo de efluente tratado, também pode conter diversos poluentes como os metais pesados, compostos orgânicos persistentes e organismos patogênicos ao homem (BETTIOL & CAMARGO, 2006).

Fazendo um panorama mundial da produção de lodo de esgoto, podemos destacar que a produção atingiu quase 1 milhão de m<sup>3</sup>/ano no Reino Unido, 50 milhões de m<sup>3</sup>/ano na Alemanha, 4,2 milhões de m<sup>3</sup>/ano na Suíça, 170 mil m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup> em Singapura (HOSSAIN et al., 2009) e 1,12 milhão de toneladas na Espanha no ano de 2005 (BARNETO et al., 2009). No Brasil, estima-se que a produção de lodo de esgoto varie entre 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano (PEDROZA et al., 2010). De acordo com dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2016), o Brasil coletou no ano de 2014 cerca de 70,9% do esgoto produzido, porém, só conseguiu tratar cerca de 40,8%. Diante desses dados, o potencial para produção de lodo de esgoto, caso todo o efluente de esgotamento sanitário fosse coletado e tratado, seria enorme. Soares em 2004 já afirmava que se todo o esgoto produzido no Brasil fosse tratado por ETEs, a produção de lodo de esgoto seria de 400 mil toneladas ao ano.

Por todos os riscos e pelo potencial de utilização do biossólido de lodo de esgoto na agricultura e no meio florestal, aliado à crescente produção diária desse material no território nacional, em 2006 o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2006) cria a resolução 375/2006 para regular a utilização desse material.

##### 3.1.2. *Panorama legal no âmbito federal: Resolução CONAMA nº 375/2006 e seus pontos pertinentes*

A Resolução nº 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2006) regulamenta e define critérios e procedimentos para a utilização agrícola do biossólido de lodo de esgoto produzidos por ETEs sanitários e seus produtos derivados.

A resolução impõe a necessidade de caracterização do lodo quanto ao seu potencial agrônômico (carbono orgânico, fósforo total, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato/nitrito, pH em água, potássio total, sódio total, enxofre total, cálcio total, magnésio total, umidade e sólidos voláteis e totais).

O lodo de esgoto deve respeitar limites de concentração máximos de metais pesados estipuladas pela resolução, conforme é apresentado na tabela 1. Deve-se ainda ser realizado o monitoramento das características do lodo de esgoto em função da quantidade de lodo aplicado anualmente ao solo, conforme apresentado pela tabela 2.

**Tabela 1:** Limites máximos de concentração de metais pesados definidos pela Resolução CONAMA 375/2006.

| Substâncias inorgânicas | Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg.Kg <sup>-1</sup> , base seca) |
|-------------------------|---|
| Arsênio (Ar)            | 41  |
| Bário (Ba)              | 1300  |
| Cádmio (Cd)             | 39  |
| Chumbo (Pb)             | 300   |
| Cobre (Cu)              | 1500  |
| Crômio (Cr)             | 1000  |
| Mercúrio (Hg)           | 17  |
| Molibdênio (Mo)         | 50  |
| Níquel (Ni)             | 420   |
| Selênio (Se)            | 100   |
| Zinco (Zn)              | 2800  |

**Tabela 2:** Frequência de monitoramento das características do lodo de esgoto ou produto derivado utilizado na agricultura ao ano, segundo a Resolução CONAMA 375/2006.

| Quantidade de lodo de esgoto aplicado (t.ano <sup>-1</sup> , base seca) | Frequência de monitoramento                      |
|---|--|
| Até 60  | Anual (anterior ao período de maior demanda)     |
| De 60 a 240   | Semestral (anterior ao período de maior demanda) |
| De 240 a 1500   | Trimestral                                       |
| De 1500 a 15000   | Bimestral  |
| Acima de 15000  | Mensal   |

A Resolução define limites máximos de substâncias orgânicas (benzenos clorados, ésteres de ftalatos, fenóis não clorados, fenóis clorados e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos), além de estabelecer classes para o lodo de esgoto em função dos microrganismos patogênicos presentes (coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella sp.* e vírus entéricos), conforme é apresentado na tabela 3.

**Tabela 3:** Classes de lodo de esgoto ou produto derivado, de acordo com a Resolução CONAMA 375/2006.

| Classe de lodo de esgoto ou produto derivado | Concentração de patógenos  |
|--|--|
| A  | Coliformes termotolerantes <10 <sup>3</sup> NMP / g de ST<br>Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo / g de ST<br><i>Salmonella</i> ausência em 10 g de ST<br>Vírus < 0,25 UFP ou UFF / g de ST |
| B  | Coliformes termotolerantes < 10 <sup>6</sup> NMP / g de ST<br>Ovos viáveis de helminto < 10 ovos / g de ST   |

ST: Sólidos Totais; NMP: Número mais provável; UFF: Unidade formadora de foco; UFP: Unidade formadora de placa

É importante ressaltar que a classificação do lodo de esgoto ou produto derivado, em classe A ou B, irá restringir a utilização ou não em determinadas culturas, utilização em APP e Unidade de Conservação, além do tempo de espera para plantio após a aplicação do material no solo, conforme determina a seção IV e os artigos 12, 13 e 14 da resolução. A utilização do lodo classe B só é permitida em culturas de café, silvicultura, produção de fibras e óleos, através de aplicação mecanizada, seguida por incorporação e respeitando a declividade do terreno. Já o lodo ou produto derivado classe A, de melhor qualidade, pode ser utilizado em qualquer cultura, desde que o intervalo entre a aplicação e o plantio corresponda a 24 meses para pastagem e 48 meses para tubérculos, olerícolas, raízes e demais partes comestíveis e culturas inundadas.

O artigo 11 da Resolução CONAMA 375/2006, inciso I, definiu que a partir de 5 anos após a publicação da resolução, somente será permitido a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado que se enquadre na classe A, exceto caso fossem propostos novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais que demonstrem a segurança na utilização do lodo de esgoto que se enquadre na classe B. Até o final do ano de 2016 ainda não havia sido publicado nenhum estudo do tipo de modo que, desde 2011, só está permitido a utilização do lodo classe A.

O artigo 17, da mesma Resolução, estabelece valores teóricos para aplicação máxima ( $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ ) a base seca de lodo de esgoto ou produto derivado, de modo que respeite os seguintes critérios: quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de N recomendado oficialmente pelo Estado) e o nitrogênio disponível no lodo ou produto derivado ( $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ), sempre levando em consideração que a mistura de lodo ou produto derivado com o solo a ser empregado à cultura não faça o pH ser elevado a níveis maiores que 7.

Outro ponto importante da Resolução CONAMA 375/2006 é que na aplicação do lodo ao solo deverá ser respeitado o limite de carga total acumulado de substâncias inorgânicas contidas no material, conforme os valores observados na tabela 4.

**Tabela 4:** Limites de carga máxima total acumulada no solo em função da aplicação de substâncias inorgânicas oriundas do lodo de esgoto ou produto derivado, de acordo com a Resolução CONAMA 375/2006.

| Substâncias inorgânicas | Concentração acumulada teórica permitida de substâncias inorgânicas pela aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) |
|-------------------------|---|
| Arsênio (Ar)            | 30  |
| Bário (Ba)              | 265   |
| Cádmio (Cd)             | 49  |
| Chumbo (Pb)             | 41  |
| Cobre (Cu)              | 123   |
| Crômio (Cr)             | 154   |
| Mercúrio (Hg)           | 1,2   |
| Molibdênio (Mo)         | 13  |
| Níquel (Ni)             | 74  |
| Selênio (Se)            | 13  |
| Zinco (Zn)              | 445   |

O inciso II do 3º artigo da Resolução veda a utilização agrícola do lodo de esgoto produzido por ETEs de instalações hospitalares, portos e aeroportos, resíduo de gradeamento, resíduos de desarenador, material lipídico sobrenadante de decantadores primários, caixa de gordura e dos reatores anaeróbicos, lodo de tratamento individual (coletado por veículo, antes do seu tratamento por uma estação de tratamento de esgoto), lodo de esgoto não estabilizado e lodos classificados como perigosos de acordo com as normas brasileiras.



### ***3.1.3. Produção do lodo de esgoto e sua classificação de acordo com a origem***

Uma ETE é composta por um conjunto de unidades de tratamento, equipamento, órgãos auxiliares, acessórios e sistemas de utilidades, que em conjunto tem a função de reduzir as cargas poluidoras do esgoto sanitário e condicionamento da matéria residual do tratamento (BIELSCHOWSKY, 2014).

A classificação do lodo de esgoto gerado é estritamente relacionada ao tipo de sistema de tratamento utilizado para a fase líquida do efluente, de acordo com Pedroza et al. (2010). O lodo produzido nos decantadores primários gera o lodo classificado como “lodo primário”. Este tipo de lodo exala um forte odor, principalmente se ficar retido por elevado tempo nos decantadores a altas temperaturas (VON SPERLING, 2002).

Pedroza et al. (2010) afirma que qualquer processo biológico de tratamento de efluente gera lodo. O mesmo autor cita que o lodo produzido na etapa biológica de tratamento do esgoto denomina-se lodo secundário ou biológico, que é a própria biomassa que se desenvolveu às custas dos nutrientes fornecidos pelo esgoto.

O lodo oriundo dos decantadores primários pode ser alocado no tratamento biológico em determinados processos de tratamento sendo a mistura entre lodo primário e secundário denominada de lodo misto (PEDROZA et al., 2010). Van Haandel & Morais (1999) ainda definem o lodo químico, que é oriundo de determinadas ETEs que utilizam processos físico-químicos para remoção de nutrientes durante o tratamento terciário do esgoto.

### ***3.1.4. Etapas do tratamento do lodo de esgoto e a transformação para biossólido***

O desenvolvimento sustentável e a globalização de informações referente ao meio ambiente, cada vez mais tem contribuído para a cobrança da sociedade sobre o modo como as cidades tem se desenvolvido, principalmente na questão do tratamento dos efluentes gerados. Desse modo, as ETEs vêm ganhando mais importância como forma de atender as exigências ambientais (PEDROZA et al., 2010) impostas pelos órgãos de fiscalização ambiental. Conseqüentemente, a médio e longo prazo haverá uma ampliação na quantidade de esgotos tratados, portanto, uma maior quantidade de lodo de esgoto será gerado e precisará de tratamento e destinação final (PEDROZA et al., 2010).

Os lodos de esgoto produzidos nas ETEs convencionais podem exibir características indesejáveis, como instabilidade biológica, possibilidade de transmissão de patógenos e grandes volumes de materiais (PEDROZA et al., 2010). Portanto, o principal objetivo do tratamento do lodo é gerar um produto que seja mais estável e com um menor volume, o que conseqüentemente irá melhorar o seu manuseio. De acordo com Pedroza et al. (2010), o processo de tratamento acontece em três processos: físico, químico e biológico.

Segundo Cassini (2003), o tratamento do lodo de esgoto, após ser gerado, obedece as seguintes etapas: I – Adensamento: redução de umidade, principalmente para diminuir o volume; II – Estabilização: redução de matéria orgânica e sólidos voláteis; III – Condicionamento: preparação para a desidratação, que ocorre principalmente de forma mecânica; IV – Desidratação: redução adicional de umidade, sobretudo para reduzir ainda mais o volume; e V – Disposição final: destinação final dos subprodutos gerados a partir do tratamento do lodo.

O adensamento tem por objetivo aumentar a concentração de sólidos no lodo, desta forma, reduz-se o volume de equipamentos necessários para tratamento nas etapas subsequentes ao tratamento (PEDROZA et al., 2010). Miki et al. (2006) afirma que a etapa do adensamento reduz custos, pois diminui o consumo de produtos químicos no desaguamento e o consumo de energia de digestores. Matcalf e Eddy (2002) afirmam que os processos de adensamento mais comuns ocorrem por gravidade, adensadores de esteira e tambor rotativo.

Andreoli et al. (2006) divide o processo de desaguamento em secagem natural e métodos mecânicos. A secagem natural ocorre geralmente em leitos de secagem e em lagoas de lodos. Já o método mecânico ocorre por filtros prensa de esteira, centrífugas, filtro de prensa de placas e prensa parafuso (VAN HAANDEL; ALEM SOBRINHO, 2006).

O condicionamento ocorre através de meios físicos ou químicos (ALÉM SOBRINHO, 2006). O condicionamento químico tem o objetivo de promover a desestabilização das partículas do lodo com a formação de flocos de maiores dimensões (MIKI et al., 2006). Já o condicionamento físico, ocorre por meio de tratamento térmico, o que resulta em lodos com menores teores de umidade (BITTON, 2001).

Metcalf & Eddy (2002) afirmam que o objetivo da estabilização do lodo de esgoto é a mineralização da fração biodegradável da matéria orgânica, o que acaba por diminuir o risco de putrefação e concentração de organismos patogênicos. Ludovice (2001) afirma que a estabilização do lodo de esgoto ocorre através dos seguintes processos: digestão aeróbia, digestão anaeróbia, compostagem, estabilização química e estabilização térmica.

### ***3.1.5. Destinação final do biossólido de lodo de esgoto***

A disposição final do biossólido de lodo de esgoto é um dos maiores problemas operacionais no processo de tratamento de lodo de esgoto, pois do valor do custo final no tratamento, ele pode alcançar cerca de 50% do montante (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

Abreu (2014) afirma que a disposição final do biossólido de lodo de esgoto deve estar contemplada no planejamento das ETEs, sempre levando em consideração as questões técnicas, econômicas, ambientais e legais. Alamino (2010) cita que, na maioria das vezes, apenas os aspectos econômico e legal são respeitados, em detrimento aos aspectos ambientais e técnicos, portanto, isso pode acarretar em destinação inadequada e a ocorrência de um possível acúmulo de contaminantes e patógenos (HALLEY; MILLER, 1991).

Existem diversos destinos para a disposição final do biossólido de lodo de esgoto como aterros sanitários (ROSA & SCHOEDER, 2009), uso como fertilizante na cobertura de taludes de aterros sanitários (CASTILHO JR et al., 2009), uso como condicionador de solo na recuperação de áreas degradadas (SELIVANOVSKAYA et al., 2003; COLODRO & ESPÍNDOLA, 2006), geração de energia (VANHAANDEL, 2009), reuso industrial (LESSA, 2005), *landfarming* (degradação biotecnológica por populações microbianas do solo), incineração e disposição oceânica (BETTIOL & CAMARGO, 2006).

A disposição final do biossólido de lodo de esgoto em aterros sanitários ainda é o principal destino desse material no Brasil (ABREU, 2015). Rosa & Schoeder (2009) afirmam que esse método de disposição apresenta algumas vantagens como baixo custo, potencial de receber quantidades variáveis de material e menor exigência na qualidade do material recebido. Porém, o mesmo autor cita uma importante desvantagem que é a diminuição da vida útil do aterro sanitário.

A reciclagem do lodo na agropecuária ou na atividade florestal pode ser considerada ambientalmente e economicamente mais viável (ANDREOLI et al., 1998) e fecharia o ciclo ao devolver os nutrientes ao solo (ANDREOLI et al., 1999), além de ser uma prática incentivada pela Resolução CONAMA 375/2006. Alguns autores, como Andreoli et al. (1999) e Guedes et al. (2005), afirmam que a reciclagem agrícola é considerada a forma mais adequada de disposição final de biossólido de lodo de esgoto. Os mesmos autores afirmam que a utilização do biossólido de lodo de esgoto como condicionador de solo e fertilizante orgânico, promove ganhos para a planta e para o produtor, visto que há redução na utilização de fertilizantes minerais.

## ***3.2. Influência da aplicação de biossólido de lodo de esgoto***

### ***3.2.1. Características físicas, químicas e biológicas do solo***

O biossólido vem se tornando uma importante fonte alternativa como condicionador e fertilizante do solo e sua utilização tem aumentado nos últimos anos, podendo no futuro se tornar um importante insumo agrícola e florestal para a recomposição de áreas degradadas (CAMPOS; ALVES, 2008).

Maio et al. (2011), em estudo com girassol cultivado em um Cambissolo Háplico em Montes Claros-MG, constataram que a aplicação de biossólido de lodo de esgoto em doses variando de 0 a 18,5 t.ha<sup>-1</sup> diminuiu o grau de dispersão de argilas e aumentou a porosidade total do solo, o grau de floculação de argilas e o índice de estabilidade de agregados úmidos; porém, não foi constatado diferenças significativas na densidade aparente do solo e na resistência a penetração. Sampaio et al. (2012) conduziram um experimento em Itatinga-SP sob um Neossolo Quartzarênico, no qual se aplicou doses e 15 a 20 t.ha<sup>-1</sup> de biossólido de lodo de esgoto em plantio de espécies arbóreas nativas. Os autores constataram a formação de agregados no solo em período variando de 6 a 12 meses após a aplicação.

Aumentos na CTC e pH do solo foram constatados por Silva & Pinto (2001) em um experimento com cana-de-açúcar sob um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, no qual foi aplicado biossólido de lodo de esgoto nas dosagens de 0; 20 e 30 t.ha<sup>-1</sup>. Oliveira et al. (2002) também constataram aumentos na CTC, pH e C-orgânico do solo em experimento conduzido na Estação Experimental do Instituto de Agrônomo de Campinas, Piracicaba-SP, após aplicação de 33, 66 e 99 t.ha<sup>-1</sup> de biossólido de lodo de esgoto.

Poucos estudos avaliaram o efeito da aplicação de biossólido de lodo de esgoto sobre a microbiota do solo. Colodro et al. (2007) avaliaram a aplicação de biossólido em cobertura e incorporado ao solo nas dosagens de 30 e 60 t.ha<sup>-1</sup>, em contraste com a aplicação de fertilizante mineral, em cultivo com eucalipto sob um Latossolo Vermelho decapitado em Selvíria-MS. Os autores constataram aumento da atividade microbiana, avaliada pela medida de evolução de CO<sub>2</sub>, nas amostras de solo.

### ***3.2.2. Biossólido de lodo de esgoto no meio florestal***

Os estudos em relação à utilização do biossólido de lodo de esgoto ainda são muito incipientes quando analisados à luz do uso em cultivos florestais em clima tropical. No Brasil, as pesquisas com utilização de biossólido de lodo de esgoto em áreas florestais são recentes. Poggiani (1998), em estudo na ESALQ/USP, iniciou as primeiras pesquisas de campo com a aplicação de lodo de esgoto em espécies florestais. O trabalho de Poggiani e Bennedeti (1999) resume o programa de pesquisa desse grupo e mostra os vários subprojetos que foram desenvolvidos para verificar a viabilidade ecológica, silvicultural e econômica da utilização do biossólido de lodo de esgoto na cultura do eucalipto.

O biossólido de lodo de esgoto apresenta alto teor de matéria orgânica, o que faz com que a liberação dos nutrientes constituintes desse material aconteça de forma gradativa no solo e, conseqüentemente, para as plantas (ABREU, 2014). Melo & Marques (2000) afirmam que essa liberação lenta de nutrientes ocorre devido a processos oxidativos da matéria orgânica, o que contribuiu para diminuição dos riscos de perdas por lixiviação.

Talvez a maior utilização potencial do biossólido de lodo de esgoto no meio florestal seja o seu aproveitamento como condicionador de solo e fertilizante para plantios comerciais (SILVA et al., 2008). Alguns autores recomendam a utilização em plantios de recomposição florestal e em recuperação de áreas degradadas (SILVA et al., 2008; BORGES et al., 2009; CALDEIRA JR et al., 2009; ALAMINO, 2010). Barbosa & Tavares Filho (2006) afirmam que o biossólido de lodo de esgoto pode servir como complemento da fertilização, portanto, minimizar a utilização desse último insumo nos reflorestamentos.

A aplicação de biossólido em plantações florestais apresenta uma série de vantagens em comparação a sistemas agrícolas. Hart et al. (1988 apud GUEDES, 2005) argumentam que pelo fato de vários dos produtos florestais não serem comestíveis, diminui o risco quanto à

entrada de possíveis contaminantes na cadeia alimentar. Outros argumentos favoráveis ao uso florestal de biofóssido descritos nesse estudo foram: I – as florestas podem responder à aplicação de biofóssido com significativos aumentos de biomassa e de nutrientes absorvidos; II – os ciclos das culturas florestais são mais longos e a acumulação de biomassa durante esse período pode ser uma maneira de retirar do solo e armazenar certos elementos perigosos, que podem ser exportados do local com a colheita da madeira; III – os solos florestais são geralmente pobres, resultando em um melhor aproveitamento e menores perdas dos nutrientes; IV – as culturas florestais oferecem menor oportunidade de contato humano com o biofóssido aplicado; V – diferente de uma cultura agrícola, na qual a aplicação deve ocorrer em uma determinada época, em uma plantação florestal, a qualquer momento seria possível entrar no povoamento para realizar a distribuição do resíduo; VI – o sistema radicular perene e bem distribuído das árvores forma um verdadeiro emaranhado de raízes finas na camada mais superficial do solo, isto aumenta a eficiência de absorção dos elementos e pode funcionar como um filtro para evitar, por exemplo, a lixiviação de nitrato (GUEDES, 2005).

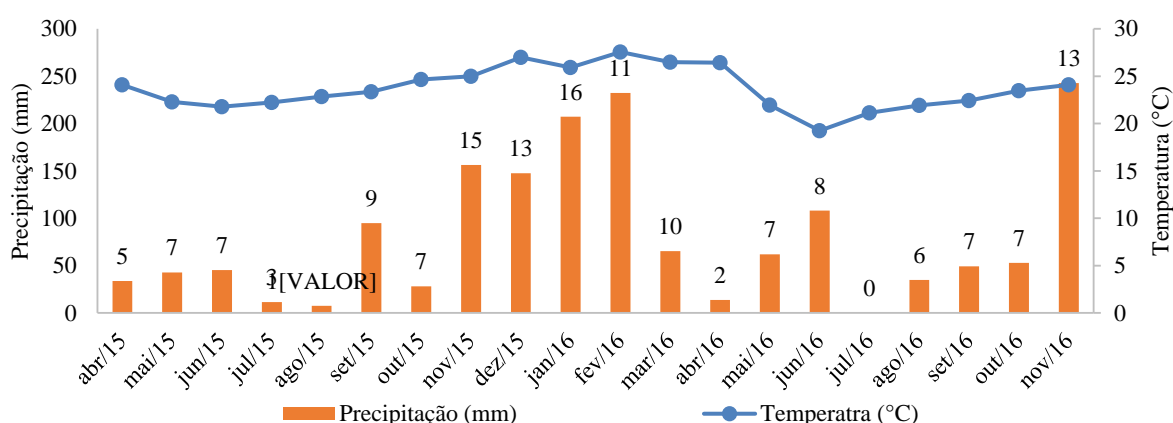
Analisando estudos referentes ao efeito da adição de biofóssido de lodo de esgoto em plantações de eucalipto, Poggiani et al. (2000) comprovaram a vantagem econômica de se aplicar o biofóssido em plantações florestais em relação ao seu descarte em aterro sanitário. Guedes (2000) verificou o aumento na produtividade, área basal e densidade de copas das árvores em povoamento de eucalipto, além do aumento na produção e na decomposição do folheto e melhorias nas condições químicas e físicas do solo. Gonçalves et al. (2000) obtiveram para eucalipto um aumento de 37% na produtividade quando se aplicou 10 t.ha<sup>-1</sup> de biofóssido juntamente com o fósforo em comparação à fertilização mineral aos 22 meses de idade. Já Guerrini et al. (2000) obteve ganhos volumétricos variando de 3 a 87% com utilização da mistura de biofóssido e cinza de madeira em *Eucalyptus grandis* aos dois anos de idade.

Estudos mais recentes com a aplicação de biofóssido de lodo de esgoto também vêm mostrando ganhos em produtividade, quando comparado com áreas onde não houve a aplicação do mesmo (NETO et al., 2007). Assenheimer (2009) cita que nos Estados Unidos alguns estudos têm mostrado que a aplicação de biofóssido promoveu maiores repostas positivas do que a fertilização nitrogenada, além do efeito perdurar por mais tempo. Ferraz (2009), estudando a influência da aplicação de 15 t.ha<sup>-1</sup> de biofóssido em plantio de *Eucalyptus grandis* em Itatinga-SP, constatou que o incremento de madeira foi 65% superior ao tratamento controle, onde não houve aplicação de nenhuma fertilização e mostrou-se muito semelhante ao tratamento que recebeu fertilização mineral.

## 4. MATERIAL & MÉTODOS

### 4.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no Campo Experimental da Embrapa Agrobiologia, município de Seropédica, RJ (latitude 22°44'35,28" S; longitude 43°40'13,56" O; datum WGS84). O clima local é do tipo Aw com verões chuvosos e invernos secos, precipitação anual média de 1.038 mm e temperatura média anual em torno de 23,9°C no período de 2011 à 2016 (INMET, 2017). No período em que foi conduzido o experimento (final de abril/2015 a novembro/2016) observou-se precipitação acumulada de 1.635 mm e temperatura média de 23,7°C. Os dados meteorológicos do período são apresentados na figura 1.



**Figura 1:** Dados climáticos de abril de 2015 a novembro de 2016 obtidos da estação meteorológica Ecologia Agrícola, Seropédica, RJ. (Fonte: INMET, 2017). Números sobre as barras indicam quantidade de dias com precipitações superiores a 1mm.

O relevo da área de instalação do experimento é plano e o solo foi classificado como Planossolo Háplico, com horizonte superficial bastante arenoso e um horizonte glei em profundidade variada caracterizado pela textura argilosa e pela influência do lençol freático (SANTOS, 2015). Foram realizadas coletas de solo nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm na área experimental com o objetivo de caracterizar quimicamente o solo. Coletaram-se 10 amostras simples por camada de solo, que posteriormente foram misturadas para formar 3 amostras compostas das 3 camadas, as quais foram analisadas no Laboratório de Química do Solo da Embrapa Agrobiologia em Seropédica, RJ (Tabela 5).

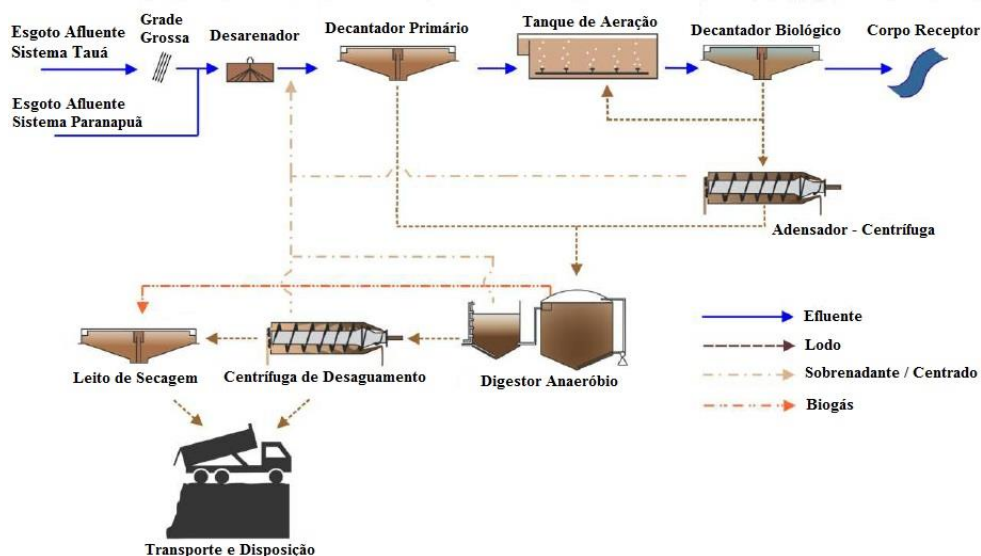
**Tabela 5:** Características químicas do Planossolo Háplico do local de instalação do experimento no Campo Experimental da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ.

| Camada (cm) | pH (unid.) | P (mg.L <sup>-1</sup> ) | K (mg.L <sup>-3</sup> ) | Ca <sup>+2</sup> (cmol <sub>c</sub> .d <sup>-3</sup> ) | Mg <sup>+2</sup> (cmol <sub>c</sub> .d <sup>-3</sup> ) | Al <sup>-3</sup> (cmol <sub>c</sub> .d <sup>-3</sup> ) | H+Al (cmol <sub>c</sub> .d <sup>-3</sup> ) | C (%) | N (%) |
|-------------|------------|-------------------------|-------------------------|--|--|--|--|-------|-------|
| 0 – 10      | 5,36       | 8,04                    | 31,47                   | 0,49   | 0,34   | 0,28   | 4,08                                       | 0,74  | 0,08  |
| 10 – 20     | 5,29       | 6,17                    | 21,98                   | 0,21   | 0,19   | 0,45   | 3,55                                       | 0,65  | 0,04  |
| 20 – 40     | 5,18       | 4,63                    | 11,26                   | 0,11   | 0,12   | 0,53   | 2,90                                       | 0,28  | 0,03  |

pH – Potenciometria; C (%) – Walkley & Black; Al<sup>-3</sup> – Titulação; Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup> – Absorção Atômica; H+Al – Titulação; K – Fotometria de Chama; N – Kjeldahl; P – Colorimétrico

#### 4.2. Formação de biossólido de lodo de esgoto na ETE Ilha do Governador

A ETE Ilha do Governador (ETIG) trata o esgoto produzido na Ilha do Governador-RJ de uma área contribuinte equivalente a 3.600 ha. Segundo Bielschowsky (2014), a ETIG foi a segunda ETE construída no Brasil utilizando o processo de lodos ativados. A vazão média de efluente dessa ETE é em torno de  $525 \text{ l.s}^{-1}$ , apresentando tratamento primário convencional, tratamento secundário (lodos ativados), adensamento de lodo secundário (centrífuga), estabilização do lodo (biológica anaeróbia), desidratação (leito de secagem) e destinação final principal para os aterros sanitários de Gericinó e/ou de Seropédica (Figura 1).



**Figura 2:** Fluxograma da formação de biossólido de lodo de esgoto, efluente tratado e biogás na ETIG. Adaptado de Bielschowsky (2014).

#### 4.3. Montagem do experimento

Um experimento de campo foi montado para testar doses de biossólido sobre o crescimento de sete espécies arbóreas florestais. O plantio das espécies, entretanto, foi realizado em duas etapas. O plantio da primeira etapa ocorreu em abril de 2015 em espaçamento  $2,5 \times 2,0 \text{ m}$  e covas com dimensões de  $20 \times 20 \times 25 \text{ cm}$ , com o plantio de mudas de *Schinus terebinthifolius* Radd. (aroeira), *Lafoensia glyptocarpa* KOEHNE (mirindiba), *Inga laurina* (Sw.) Willd. (ingá-laurina) e *Senna multijuga* (Rich.) (pau-cigarra). O plantio na segunda etapa ocorreu em março de 2016 com o plantio das espécies *Genipa americana* (Vell.) Brenan (jenipapo), *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub (farinha seca) e *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong (orelha-de-negro), também em covas de  $20 \times 20 \times 25 \text{ cm}$ . As mudas utilizadas em ambas as etapas de plantio foram produzidas em sacolas plásticas com dimensões de  $9,7 \times 20 \text{ cm}$  (diâmetro x altura), exceto mudas de pau-cigarra, que foram produzidas em tubetes de  $280 \text{ cm}^3$ . As doses de biossólido que foram utilizadas nas duas etapas de plantio foram de 0, 2, 4 e  $8 \text{ L.cova}^{-1}$  de plantio. Um controle adicional consistiu da aplicação de fertilização mineral com macro e micronutrientes em quantidades aproximadas à presente em 4 L de biossólido. O experimento foi montado em esquema inteiramente casualizado com 15 repetições, sendo cada planta considerada uma repetição.

O biossólido utilizado nas duas etapas de plantio foi produzido na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Ilha do Governador, Rio de Janeiro. O biossólido foi avaliado quanto aos teores totais de nutrientes no Laboratório de Química do Solo da Embrapa Agrobiologia, através da digestão do material em solução nitro-perclórica, semelhantemente ao que é feito com tecido vegetal (Tabela 6).

**Tabela 6:** Análise de nutrientes totais (digestão de tecidos) do bioossólido de lodo de esgoto da ETIG, RJ.

| Nutrientes no bioossólido ETIG | Unidade            |       |
|--------------------------------|--------------------|-------|
| Ca                             | g.Kg <sup>-1</sup> | 18,11 |
| K                              | g.Kg <sup>-1</sup> | 1,40  |
| Mg                             | g.Kg <sup>-1</sup> | 3,65  |
| N                              | %                  | 1,62  |
| P                              | g.Kg <sup>-1</sup> | 7,37  |

Ca e Mg – absorção atômica; K – fotometria de chama; N – Kjeldahl; P – colorimetria.

As quantidades de N, P e K aplicados no tratamento com fertilização mineral foram calculadas em função dos teores totais de nutrientes presentes em uma dose de 4 L do bioossólido utilizado. Estas quantidades foram equivalente a 38 g de N, 80 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 8 g de K<sub>2</sub>O. Assim, foram aplicados no plantio uma mistura formada por 38 g de sulfato de amônio, 166 g de fosfato natural, 221 g de superfosfato simples e 3 g de cloreto de potássio. A adubação complementar de N e K foi feita em cobertura aos 3 e aos 6 meses de idade com a aplicação de 35 g de ureia e 5 g de cloreto de potássio por cova em cada aplicação. Para o fornecimento de micronutrientes no tratamento com fertilização mineral foram aplicados 20 g de FTE-BR12 por cova de plantio.

O preparo da área experimental consistiu em roçadas em área total, coroamento de 60 cm de diâmetro e abertura das covas. Em seguida foram colocadas as doses de bioossólido e a de fertilização mineral, exceto na testemunha absoluta. Na sequência o bioossólido e o fertilizante mineral foram misturados nas covas utilizando motocoveador com broca de plantio. As manutenções consistiram de controle de formigas cortadeiras e roçadas periódicas (de 3 a 4 por ano).

Um mês após o plantio foi realizada uma avaliação da mortalidade das espécies e, sendo constatado algum indivíduo morto, o mesmo foi repostado por outro da mesma espécie.

#### 4.4. Avaliações

A primeira avaliação de crescimento do experimento da primeira etapa ocorreu aos 4 meses após o plantio; porém, as avaliações seguintes ocorreram em intervalos de 3 meses, até os 19 meses de idade. Já as avaliações de crescimento das espécies florestais da segunda etapa de plantio ocorreram em intervalos definidos de 3 meses até os 9 meses de idade. As variáveis avaliadas foram altura total, diâmetro ao nível do solo (DNS) (apenas na implantação e na última avaliação) e o comprimento de copa transversal e longitudinal às linhas de plantio segundo a metodologia descrita por Macho & Filho, 2006 (somente na última avaliação). Através das larguras transversal (L<sub>1</sub>) e longitudinal (L<sub>2</sub>) à linha de plantio, foi calculado a área de copa (C<sub>i</sub>) de cada indivíduo, sempre considerando a copa das espécies florestais como uma elipse perfeita, através da equação:

$$C_i = \pi \times \left[ \left( \frac{L_1 + L_2}{4} \right)^2 \right]$$

Em 24 de novembro de 2016 foi realizada uma coleta de folhas das espécies de cada tratamento para obtenção do teor de macronutrientes. Para cada tratamento, foram amostrados 4 indivíduos que mais se aproximavam da média de DNS do tratamento. Foram coletadas folhas do terço médio da copa dos indivíduos. Posteriormente, as amostras foram enviadas para o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) para serem analisadas.

#### **4.5. *Análise dos dados***

Foram elaboradas curvas de crescimento em altura ao longo das medições tendo como referência a altura de cada muda no momento do plantio. Desse modo, as curvas representaram de fato o incremento cumulativo da altura ao longo do período de avaliação.

Os dados foram submetidos à análise de regressão linear para avaliar a relação entre variáveis de crescimento ou teores de nutrientes foliares e as doses de biossólido. Para comparar o efeito do tratamento controle em relação aos tratamentos com aplicação de diferentes doses de biossólido e o tratamento com fertilizante mineral foi realizado o teste de comparação múltipla com um controle (MCC test), também conhecido como teste de Dunnett. Esse teste consiste na comparação de cada tratamento experimental em relação a um único tratamento controle por meio do cálculo da estatística t de Student.



## 5. RESULTADOS

Na tabela 7 são apresentados os valores de taxa de sobrevivência das 7 espécies da Mata Atlântica avaliadas. Em geral, plantas que receberam o fertilizante mineral apresentaram menor sobrevivência, embora tenha havido grande variação dentre as espécies. As mais afetadas foram *S. multijuga*, *I. laurina* e *L. glyptocarpa* as quais apresentaram 0%, 20% e 30% de sobrevivência, todas elas pertencentes as espécies plantadas na primeira etapa de plantio.

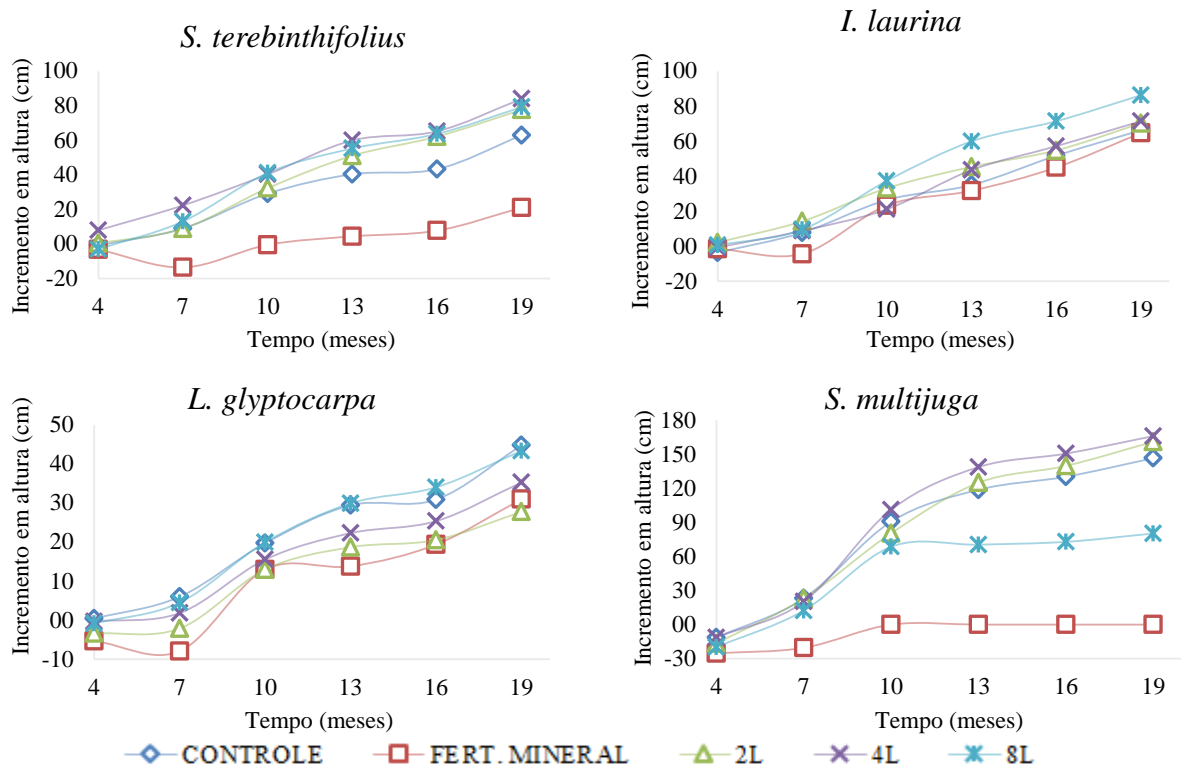
A aplicação de bio sólido não aumentou a taxa de sobrevivência das plantas aos 9 ou 19 meses após o plantio (Tabela 7). Em geral, plantas que receberam 2 ou 4 litros de bio sólido na cova de plantio obtiveram taxas de sobrevivência muito próximas à de plantas que não receberam bio sólido ou fertilizante mineral. Entretanto, houve tendência de redução da sobrevivência na dose mais alta de bio sólido equivalente a 8 L por cova, especialmente para *S. multijuga*, *I. laurina* e *L. glyptocarpa*, mesmas espécies que foram bastante sensíveis à aplicação de fertilização mineral.

**Tabela 7:** Percentual de sobrevivência de sete espécies florestais da Mata Atlântica aos 9 meses (*P. dubium*, *G. americana* e *E. contortisiliquum*) e aos 19 meses (*S. terebinthifolius*, *I. laurina*, *L. glyptocarpa* e *S. multijuga*) após o plantio, em função da aplicação da aplicação de doses de bio sólido de lodo de esgoto ou adubação com fertilizante mineral (FM).

| Espécie                        | Dose de bio sólido |     |     |     | FM |
|--------------------------------|--------------------|-----|-----|-----|----|
|                                | 0 L                | 2 L | 4 L | 8 L |    |
| ----- % -----                  |                    |     |     |     |    |
| Espécies com 19 meses de idade |                    |     |     |     |    |
| <i>S. terebinthifolius</i>     | 93                 | 93  | 100 | 100 | 87 |
| <i>I. laurina</i>              | 73                 | 67  | 53  | 40  | 20 |
| <i>L. glyptocarpa</i>          | 73                 | 93  | 87  | 60  | 33 |
| <i>S. multijuga</i>            | 60                 | 47  | 47  | 40  | 0  |
| <i>Média</i>                   | 75                 | 75  | 72  | 60  | 35 |
| Espécies com 9 meses de idade  |                    |     |     |     |    |
| <i>P. dubium</i>               | 100                | 100 | 100 | 100 | 87 |
| <i>G. americana</i>            | 93                 | 100 | 93  | 87  | 80 |
| <i>E. contortisiliquum</i>     | 93                 | 93  | 93  | 93  | 93 |
| <i>Média</i>                   | 95                 | 98  | 95  | 93  | 87 |

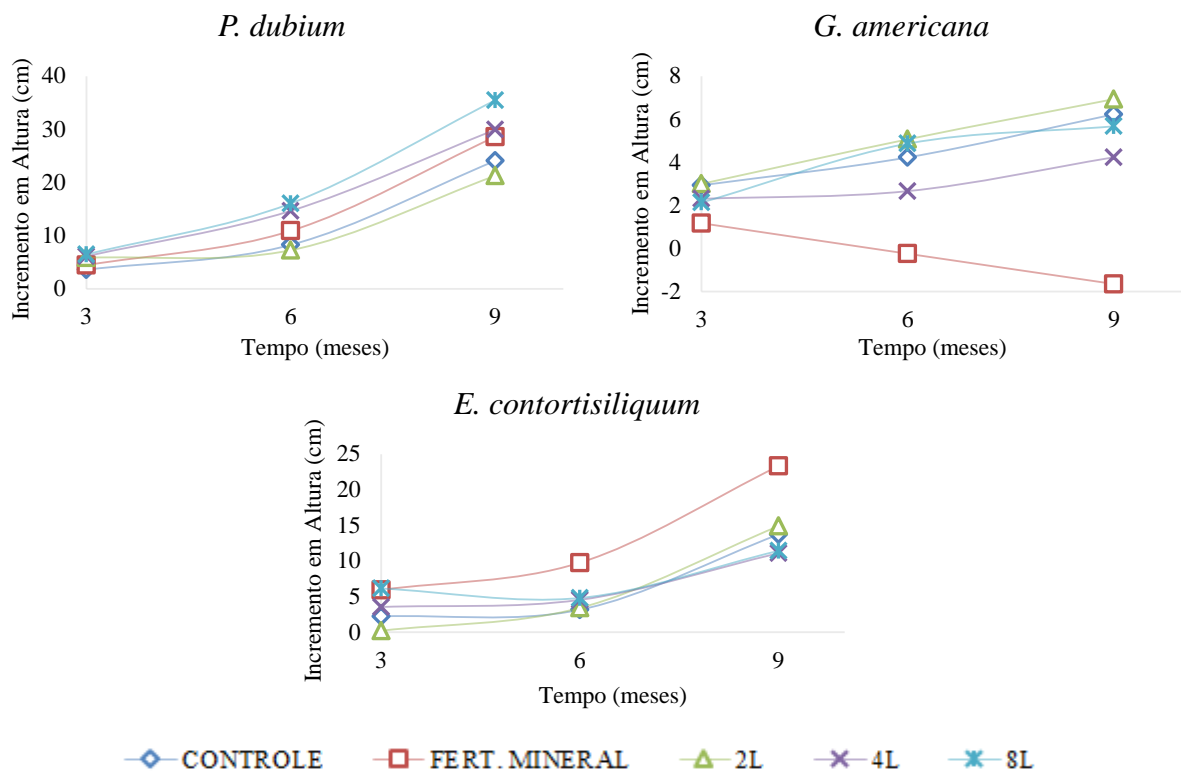
As curvas de incremento cumulativo em altura das espécies plantadas na primeira etapa de plantio, mostraram efeitos diferenciados do bio sólido sobre as espécies testadas (Figura 3). O aumento da dose de bio sólido em *S. terebinthifolius* favoreceu o incremento em altura quando comparado ao tratamento controle sem bio sólido, efeito que se intensificou a partir dos 13 meses após o plantio. Espécies que não apresentaram resposta positiva de crescimento em altura em função da aplicação do bio sólido foram *L. glyptocarpa* e *S. multijuga*. Enquanto a maior dose de bio sólido (8 L) favoreceu a espécies *I. laurina*, porém, reduziu sensivelmente o incremento em altura de *S. multijuga* (Figura 3).

Plantas de *S. terebinthifolius* e *S. multijuga* que receberam fertilização mineral apresentaram os menores incrementos em altura, quando confrontados com os resultados apresentados para a mesma dose de bio sólido em *L. glyptocarpa* e *S. multijuga* (Figura 3).



**Figura 3:** Incremento cumulativo em altura de quatro espécies ao longo de 19 meses de período de crescimento, sob diferentes doses de bio sólido de lodo de esgoto (0, 2, 4 e 8 L) e controle com fertilização mineral.

As espécies da segunda etapa de plantio também apresentaram efeito diferenciado em função dos tratamentos aplicados, ora apresentando melhores resultados com a aplicação de bio sólido, ora com a aplicação de fertilizante mineral (Figura 4). O aumento da dose de bio sólido beneficiou o crescimento de *P. dubium* a partir da dose de 4 L/cova. As espécies *G. americana* e *E. contortisiliquum* não responderam à aplicação das doses de bio sólido, mas responderam de forma antagônica quando adubadas com fertilizante mineral (Figura 4). Desse modo, *G. americana* apresentou incremento em altura negativo para esse tratamento, enquanto que *E. contortisiliquum* foi beneficiado pela aplicação de fertilizante mineral, apresentando para esse tratamento o maior incremento em altura superior aos tratamentos controle ou com bio sólido (Figura 4).



**Figura 4:** Incremento cumulativo em altura de três espécies ao longo de 9 meses de período de crescimento, sob diferentes doses de biofósforo de lodo de esgoto (0, 2, 4 e 8 L) e controle com fertilização mineral.

O efeito de doses de biofósforo sobre variáveis de crescimento pôde ser expresso por equações de regressão linear para *S. terebinthifolius* (incremento em DNS), *L. glyptocarpa* (incremento em altura) e *P. dubium* (incremento em altura, DNS e área de copa) (Tabela 8). De acordo com os modelos ajustados, o aumento da dose de biofósforo levou ao aumento linear do incremento em DNS de *S. terebinthifolius*, do incremento em altura de *L. glyptocarpa* e de todas as variáveis de crescimento de *P. dubium* (Tabela 8). No entanto, a aplicação da dose de 8 L de biofósforo reduziu em até 50% o crescimento de *S. multijuga*.

A aplicação da fertilização mineral reduziu significativamente todas variáveis de crescimento de *S. terebinthifolius* ( $p < 0,05$ ). Tendência similar foi observada para *G. americana* (área de copa), *L. glyptocarpa* (DNS) e *P. dubium* (altura) ( $p < 0,17$ ). Entretanto, *E. contortisiliquum* mostrou resposta positiva à adubação mineral, especialmente na variável de crescimento em altura que foi cerca de 70% superior ao controle (Tabela 8).

As espécies *I. laurina*, *G. americana* e *E. contortisiliquum* não apresentaram resposta à aplicação de biofósforo, apresentando incrementos em altura, DNS e área de copa estatisticamente similares (Tabela 8).

**Tabela 8:** Taxas de incremento em altura e diâmetro ao nível do solo (DNS) e área de copa de espécies florestais do bioma Mata Atlântica adubadas com 0, 2, 4, ou 8 L de biofósforo de lodo de esgoto ou com fertilizantes minerais (FM). Modelos de regressão linear (MRL) para estimar a variável de crescimento em função das doses de biofósforo são apresentados para cada espécie, quando significativos. Os asteriscos seguidos das médias indicam o nível de significância da comparação par a par entre o tratamento controle (0 L) e cada nível de adubação com biofósforo ou fertilizante mineral.

| Espécie (idade)                          | Trat. | Incremento altura      |                      | Incremento DNS         |                      | Área de copa           |                      |
|--|-------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
|  |       | cm/mês                 | MRL                  | mm/mês                 | MRL                  | m <sup>2</sup>         | MRL                  |
| <i>S. terebinthifolius</i><br>(19 meses) | 0 L   | 3,62                   |                      | 1,09                   |                      | 2,76                   |                      |
|  | 2 L   | 4,14                   |                      | 1,26                   | $y=1,1498 + 0,0411x$ | 4,01 <sup>(0,07)</sup> |                      |
|  | 4 L   | 4,42 <sup>(0,19)</sup> |                      | 1,38*                  |                      | 3,65 <sup>(0,18)</sup> |                      |
|  | 8 L   | 4,17                   |                      | 1,44*                  | $R^2 = 0,09$         | 3,59                   |                      |
|  | FM    | 2,18*                  |                      | 0,84*                  |                      | 1,84*                  |                      |
| <i>I. laurina</i><br>(19 meses)          | 0 L   | 3,45                   |                      | 1,04                   |                      | 1,31                   |                      |
|  | 2 L   | 4,19                   |                      | 1,10                   |                      | 1,11                   |                      |
|  | 4 L   | 3,53                   |                      | 1,17                   |                      | 1,24                   |                      |
|  | 8 L   | 4,17                   |                      | 1,17                   |                      | 1,58                   |                      |
|  | FM    | 3,09                   |                      | 0,98                   |                      | 0,82                   |                      |
| <i>L. glyptocarpa</i><br>(19 meses)      | 0 L   | 2,24                   |                      | 0,84                   |                      | 0,60                   |                      |
|  | 2 L   | 1,55 <sup>(0,15)</sup> | $y=1,7969 + 0,0937x$ | 0,73                   |                      | 0,43                   |                      |
|  | 4 L   | 2,06                   |                      | 0,73                   |                      | 0,51                   |                      |
|  | 8 L   | 2,81                   | $R^2 = 0,04$         | 0,89                   |                      | 0,76                   |                      |
|  | FM    | 1,61                   |                      | 0,60 <sup>(0,15)</sup> |                      | 0,38                   |                      |
| <i>S. multijuga</i><br>(19 meses)        | 0 L   | 7,71                   |                      | 1,59                   |                      | 3,12                   |                      |
|  | 2 L   | 8,35                   |                      | 1,64                   |                      | 2,74                   |                      |
|  | 4 L   | 8,71                   |                      | 1,88                   |                      | 3,74                   |                      |
|  | 8 L   | 4,05*                  |                      | 0,93 <sup>(0,12)</sup> |                      | 1,18*                  |                      |
|  | FM    | -                      |                      | -                      |                      | -                      |                      |
| <i>P. dubium</i><br>(9 meses)            | 0 L   | 2,34                   |                      | 1,01                   |                      | 0,43                   |                      |
|  | 2 L   | 2,85                   | $y=2,2670 + 0,2960x$ | 0,96                   | $y=0,9541 + 0,0378x$ | 0,46                   | $y=0,4387 + 0,0170x$ |
|  | 4 L   | 3,33*                  |                      | 1,10                   |                      | 0,53                   |                      |
|  | 8 L   | 4,71*                  | $R^2 = 0,37$         | 1,28 <sup>(0,12)</sup> | $R^2 = 0,06$         | 0,56 <sup>(0,11)</sup> | $R^2 = 0,07$         |
|  | FM    | 2,98 <sup>(0,17)</sup> |                      | 0,86                   |                      | 0,54                   |                      |
| <i>G. americana</i><br>(9 meses)         | 0 L   | 0,73                   |                      | 0,12                   |                      | 0,08                   |                      |
|  | 2 L   | 0,77                   |                      | 0,12                   |                      | 0,08                   |                      |
|  | 4 L   | 0,81                   |                      | 0,13                   |                      | 0,06                   |                      |
|  | 8 L   | 0,70                   |                      | 0,14                   |                      | 0,07                   |                      |
|  | FM    | 0,74                   |                      | 0,07                   |                      | 0,05 <sup>(0,17)</sup> |                      |
| <i>E. contortisiliquum</i><br>(9 meses)  | 0L    | 1,64                   |                      | 0,48                   |                      | 0,16                   |                      |
|  | 2L    | 1,95                   |                      | 0,44                   |                      | 0,17                   |                      |
|  | 4L    | 1,79                   |                      | 0,35                   |                      | 0,14                   |                      |
|  | 8L    | 1,54                   |                      | 0,41                   |                      | 0,16                   |                      |
|  | FM    | 2,85*                  |                      | 0,46                   |                      | 0,19                   |                      |

\*  $p < 0,05$ ; Expoentes numéricos entre parênteses indicam  $0,05 < p < 0,20$ .

Modelos de regressão linear foram ajustados para explicar o efeito da dose de biofóssido sobre o teor de macronutrientes para os seguintes elementos e espécies: S para *I. laurina*; P e Ca para *L. glyptocarpa* e Mg para *S. multijuga* (Tabela 9). Todos esses modelos tiveram um ajuste quadrático, mostrando que o aumento nas doses de biofóssido contribuíram para o aumento no teor foliar desses nutrientes nas respectivas espécies citadas até um nível crítico. O nível crítico para S em *I. laurina* se mostrou em torno de 2 L de biofóssido por cova; para Ca e P em *L. glyptocarpa*, entre 4 e 8 L e para Mg em *S. multijuga*, entorno de 4 L. Ao contrário desse padrão, houve um decréscimo linear do teor de P foliar em *G. americana* com o aumento da dose de biofóssido (Tabela 9).

A aplicação de fertilizantes minerais, em conteúdo equivalente ao presente na dose de 4 L de biofóssido, aumentou significativamente o teor de P foliar de *L. glyptocarpa* em relação ao controle (dose 0 L de biofóssido), mas não diferiu dos tratamentos com aplicação de 2, 4 ou 8 L de biofóssido. Os teores de P foliar também foram maiores em plantas de *G. americana* e *E. contortisiliquum* que receberam adubação mineral em relação a todos os demais tratamentos. Para *P. dubium*, o teor de P foliar no tratamento com fertilizante mineral foi superior apenas aos com aplicação de 0, 2 ou 4 L de biofóssido, não diferindo do tratamento com aplicação de 8 L de biofóssido por cova de plantio (Tabela 9).

Os teores de N foliar de *G. americana* e de *P. dubium* aumentaram com a adubação mineral, exceto no tratamento com dose de 2 L de biofóssido em *P. dubium*. Esse efeito não foi observado para nenhuma outra espécie avaliada (Tabela 9). Em geral, não houveram alterações nos teores de K, Ca, Mg e S foliares das espécies avaliadas pela aplicação de adubação mineral em relação ao tratamento controle, à exceção do aumento do teor de Ca foliar de *L. glyptocarpa*. Entretanto, plantas de *I. laurina* que receberam biofóssido (2 e 4 L) apresentaram maiores teores de S que o tratamento com fertilizantes minerais. O mesmo ocorreu para os teores de K e Ca (dose de 8 L) em *L. glyptocarpa*, teores de Ca e Mg (dose de 2 L) em *P. dubium*, teores de K e Mg (dose de 8 L) em *G. americana* e teores de Ca e Mg (dose de 2 L) em *E. contortisiliquum*.

Não foi possível realizar análise de comparação do teor nutricional entre as dosagens de biofóssido de lodo de esgoto com o tratamento com fertilizantes minerais para *S. multijuga*, pois o tratamento com fertilizante mineral apresentou 100% de mortalidade.

**Tabela 9:** Teor de macronutrientes foliares aos 19 meses para as espécies *S. terebinthifolius*, *I. laurina*, *L. glyptocarpa* e *S. multijuga* e, aos 9 meses, para as espécies *P. dubium*, *G. americana* e *E. contortisiliquum*. Modelos de regressão linear (MRL) para estimar o teor de nutrientes foliar em função das doses de biossólido são apresentados para cada espécie quando significativos. Os asteriscos seguidos das médias indicam o nível de significância da comparação entre o tratamento controle (0 L) e cada nível de adubação com biossólido ou fertilizante mineral.

(continua)

| Espécie                    | Trat. | N                       | P                      | K                      | Ca                      |                        | Mg                     | S     |                        |
|----------------------------|-------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------|------------------------|
|                            |       |                         |                        |                        | g,Kg <sup>-1</sup>      |                        |                        |       |                        |
| <i>S. terebinthifolius</i> | 0 L   | 15,1                    | 1,72                   | 9,14                   | 6,21                    |                        | 1,84                   | 2,92  |                        |
|                            | 2 L   | 14,2                    | 2,16                   | 9,94                   | 6,59                    |                        | 2,02                   | 2,97  |                        |
|                            | 4 L   | 15,5                    | 1,94                   | 9,14                   | 7,44                    |                        | 2,04                   | 3,00  |                        |
|                            | 8 L   | 15,0                    | 1,66                   | 8,25                   | 7,95 <sup>(0,14)</sup>  |                        | 2,08                   | 2,80  |                        |
|                            | FM    | 15,9                    | 2,23 <sup>(0,20)</sup> | 10,85                  | 6,83                    |                        | 2,33 <sup>(0,16)</sup> | 3,24  |                        |
| <i>I. laurina</i>          | 0 L   | 20,0                    | 1,35                   | 5,28                   | 3,63                    |                        | 1,08                   | 1,06  |                        |
|                            | 2 L   | 24,0 <sup>(0,13)</sup>  | 1,41                   | 5,34                   | 4,60 <sup>(0,11)</sup>  |                        | 1,02                   | 1,26* | y=1,0874 + 0,0734x     |
|                            | 4 L   | 22,0                    | 1,37                   | 4,45 <sup>(0,12)</sup> | 4,17                    |                        | 0,88 <sup>(0,07)</sup> | 1,20* | + 0,0085x <sup>2</sup> |
|                            | 8 L   | 21,8                    | 1,39                   | 4,57 <sup>(0,18)</sup> | 3,43                    |                        | 0,97                   | 1,14  | R <sup>2</sup> = 0,30  |
|                            | FM    | 21,1                    | 1,29                   | 5,02                   | 4,17                    |                        | 0,99                   | 1,05  |                        |
| <i>L. glyptocarpa</i>      | 0 L   | 11,54                   | 1,64                   | 9,38                   | 5,47                    |                        | 2,21                   | 2,24  |                        |
|                            | 2 L   | 12,27                   | 2,38 <sup>(0,11)</sup> | 9,57                   | 8,26 <sup>***</sup>     | y=5,7088 + 1,1163x     | 2,05                   | 2,22  |                        |
|                            | 4 L   | 13,09 <sup>(0,13)</sup> | 2,43 <sup>(0,09)</sup> | 9,95                   | 8,36 <sup>***</sup>     | - 0,0829x <sup>2</sup> | 2,11                   | 2,38  |                        |
|                            | 8 L   | 13,07 <sup>(0,13)</sup> | 2,01                   | 7,33                   | 9,40 <sup>***</sup>     | R <sup>2</sup> = 0,62  | 2,22                   | 1,82  |                        |
|                            | FM    | 11,97                   | 2,46 <sup>(0,08)</sup> | 10,77                  | 7,41*                   |                        | 1,89                   | 2,01  |                        |
| <i>S. multijuga</i>        | 0 L   | 19,40                   | 1,80                   | 6,91                   | 6,80                    |                        | 1,79                   | 1,58  |                        |
|                            | 2 L   | 18,83                   | 2,58 <sup>(0,15)</sup> | 7,11                   | 9,97 <sup>(0,20)</sup>  |                        | 2,15                   | 1,70  | y=1,7433 + 0,3423x     |
|                            | 4 L   | 20,41                   | 2,07                   | 6,99                   | 10,47 <sup>(0,14)</sup> |                        | 2,56*                  | 1,48  | - 0,0400x <sup>2</sup> |
|                            | 8 L   | 18,14                   | 2,37                   | 6,89                   | 11,01 <sup>(0,10)</sup> |                        | 1,91                   | 1,84  | R <sup>2</sup> = 0,33  |
|                            | FM    | -                       | -                      | -                      | -                       |                        | -                      | -     |                        |

\*p < 0,05; \*\*p < 0,01; \*\*\*p < 0,001. Expoentes numéricos entre parênteses indicam 0,05 < p < 0,20.

**Tabela 9:** Teor de macronutrientes foliares aos 19 meses para as espécies *S. terebinthifolius*, *I. laurina*, *L. glyptocarpa* e *S. multijuga* e, aos 9 meses, para as espécies *P. dubium*, *G. americana* e *E. contortisiliquum*. Modelos de regressão linear (MRL) para estimar o teor de nutrientes foliar em função das doses de biossólido são apresentados para cada espécie quando significativos. Os asteriscos seguidos das médias indicam o nível de significância da comparação entre o tratamento controle (0 L) e cada nível de adubação com biossólido ou fertilizante mineral.

| Espécie                    | Tratamento | N                       | P                      | K                      | Ca                     | Mg                     | S                      | (conclusão)        |
|----------------------------|------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
|                            |            |                         |                        |                        |                        |                        |                        | g.Kg <sup>-1</sup> |
| <i>P. dubium</i>           | 0 L        | 16,88                   | 1,15                   | 6,80                   | 4,485                  | 1,66                   | 2,62                   |                    |
|                            | 2 L        | 15,97                   | 1,12                   | 5,68                   | 6,29 <sup>(0,09)</sup> | 2,02                   | 2,97                   |                    |
|                            | 4 L        | 16,38                   | 1,17                   | 6,78                   | 5,70                   | 1,84                   | 3,16                   |                    |
|                            | 8 L        | 16,58                   | 1,41 <sup>(0,16)</sup> | 6,47                   | 5,38                   | 1,86                   | 3,37 <sup>(0,16)</sup> |                    |
|                            | FM         | 28,64*                  | 1,50 <sup>(0,08)</sup> | 6,68                   | 4,01                   | 1,49                   | 2,97                   |                    |
| <i>G. americana</i>        | 0 L        | 16,27                   | 2,39                   | 11,25                  | 4,83                   | 3,07                   | 1,63                   |                    |
|                            | 2 L        | 19,82                   | 2,10                   | 9,79                   | 3,74                   | 3,14                   | 1,79                   |                    |
|                            | 4 L        | 16,66                   | 1,86                   | 10,75                  | 4,89                   | 2,73                   | 1,92                   |                    |
|                            | 8 L        | 14,75                   | 1,26 <sup>(0,09)</sup> | 6,98 <sup>(0,14)</sup> | 4,70                   | 4,23 <sup>(0,11)</sup> | 1,84                   |                    |
|                            | FM         | 22,55 <sup>(0,08)</sup> | 3,24                   | 11,87                  | 5,66                   | 2,99                   | 2,08                   |                    |
| <i>E. contortisiliquum</i> | 0 L        | 33,29                   | 1,47                   | 8,13                   | 1,45                   | 1,64                   | 1,92                   |                    |
|                            | 2 L        | 27,08 <sup>(0,16)</sup> | 1,41                   | 7,51                   | 4,27 <sup>(0,06)</sup> | 1,80                   | 1,72                   |                    |
|                            | 4 L        | 29,71                   | 1,50                   | 7,33                   | 2,25                   | 1,22 <sup>(0,15)</sup> | 1,77                   |                    |
|                            | 8 L        | 29,32                   | 1,33                   | 8,07                   | 1,73                   | 1,58                   | 1,85                   |                    |
|                            | FM         | 26,95 <sup>(0,15)</sup> | 2,42*                  | 9,34                   | 1,48                   | 1,31                   | 1,93                   |                    |

\*p < 0,05; \*\*p < 0,01; \*\*\*p < 0,001. Expoentes numéricos entre parênteses indicam 0,05 < p < 0,20.

## 6. DISCUSSÃO

O baixo percentual de sobrevivência das plantas na primeira etapa de plantio, à exceção de *S. terebinthifolius*, pode estar associada à baixa precipitação apresentada no mês que sucedeu o plantio (Figura 2). Durante esse período a mortalidade foi sensivelmente maior no tratamento com aplicação de fertilizantes minerais e, em menor grau, no tratamento com aplicação da dose mais alta de biossólido ( $8 \text{ L.cova}^{-1}$ ). Um possível aumento de solutos no solo devido à aplicação dos fertilizantes minerais e do biossólido na maior dose pode ter reduzido o potencial osmótico do solo ao ponto de limitar a capacidade de absorção de água pelas raízes das plantas durante o período de déficit hídrico após o plantio. Sabe-se que a salinidade no solo, além de poder afetar as plantas em funções osmóticas, pode provocar toxidez, afetar a cadeia respiratória, a fotofosforilação, prejudicar a assimilação de nitrogênio e o metabolismo de proteínas (MUNNS, 2002; TESTER & DAVENPORT, 2003). A hipótese de mortalidade de plantas devido à redução do potencial osmótico do solo é corroborada pelo fato de que no plantio da segunda etapa, apesar de se tratar de espécies distintas, ter havido boa disponibilidade hídrica e elevada taxa de sobrevivência das plantas sob todos os tratamentos.

A espécie com a menor taxa de sobrevivência, *S. multijuga* (Tabela 7), foi a única em que as mudas foram produzidas em tubetes de  $280 \text{ cm}^3$ , o que torna a planta mais vulnerável após o plantio sob ocorrência de déficit hídrico em razão do pouco volume de substrato. Salienta-se que durante o plantio não foi aplicado retentor hídrico (hidrogel de plantio), o qual poderia minimizar a falta de água durante os primeiros dias após o plantio. Por outro lado, a alta sobrevivência de *S. terebinthifolius* no plantio da primeira etapa demonstra uma melhor adaptação dessa espécie às condições de déficit hídrico e salinidade do solo decorrente da aplicação da fertilização mineral.

A aplicação de lodo de esgoto no solo, além de fornecer nutrientes às plantas, atua na melhoria da estruturação das partículas do solo, favorecendo a infiltração de água e o desenvolvimento do sistema radicular (ANDREOLI et al., 2001; BARBOSA & TAVARES FILHO, 2006; ABREU, 2014). Neste trabalho, apesar do possível problema com a salinização na cova de plantio, o biossólido contribuiu para que as espécies *S. terebinthifolius*, *L. glyptocarpa*, *P. dubium* respondessem de forma positiva à aplicação de biossólido na cova de plantio na maioria dos parâmetros silviculturais mensurados (incremento em altura e DNS e área de copa). Os dados desse estudo são corroborados por Lima Filho (2015), que ao comparar três tratamentos distintos aplicados na cova no momento do plantio (testemunha absoluta, 3 L de biossólido e 210 g de superfosfato simples) constatou que a aplicação de biossólido resultou no maior crescimento em altura, diâmetro ao nível do solo e de área de copa das espécies *P. dubium*, *Ceiba speciosa* e *Sapindus saponaria* plantadas em um Latossolo Vermelho Amarelo em Bom Jardim, região Serrana do Rio de Janeiro.

As espécies *I. laurina* e *G. americana* não apresentaram resposta à aplicação de biossólido em nenhuma das variáveis de crescimento avaliadas (Tabela 7). Em estudo anterior conduzido por Silva & Pinto (2010) utilizando as espécies *Luehea divaricata*, *Cedrela fissilis*, *Lonchocarpus muehlbergianus*, *Erythrina falcate*, *Aspidosperma polyneuron*, *Erythroxylum deciduum* e *Araucaria angustifolia* também não foi encontrada diferenças significativas de crescimento entre tratamentos com aplicação de biossólido ou fertilização mineral e a testemunha absoluta, 36 meses após o plantio. Estes resultados demonstram que há uma grande variabilidade de resposta à adubação entre espécies arbóreas nativas. Como visto, várias delas são pouco responsivas à adubação, provavelmente por apresentarem alto grau de rusticidade e adaptação a solos de baixa fertilidade.

Há discordância na literatura quanto a exigência nutricional de espécies nativas utilizadas em reflorestamento. Carpenezzi et al. (1976) relatam que informações nutricionais



de espécies nativas são escassas, enquanto Gonçalves (1994) afirma que essências florestais típicas da Mata Atlântica são muito dependentes da fertilidade do solo. Já Dias et al. (1994) alertam que a maior parte da informação disponível foi obtida em estudos conduzidos em casa de vegetação os quais não necessariamente refletem o comportamento em condição de campo. A espécie *E. contortisiliquum*, no presente estudo, foi prejudicada pela adição de biofóssido, apresentando os menores valores dos parâmetros avaliados para os tratamentos com adição de biofóssido, quando comparado ao tratamento com fertilização mineral (Tabela 7). Isso pode ter ocorrido em função da exigência da espécie por nutrientes do solo, que é pobre (Tabela 5) e pelo fato do biofóssido ser uma fonte de nutrientes com disponibilidade a longo prazo, portanto, como a fertilização mineral disponibilizou esses nutrientes de forma imediata a partir da aplicação no plantio, além das adubações de cobertura, esse tratamento influenciou de forma positiva os parâmetros avaliados.

De forma geral, as doses de biofóssido de lodo de esgoto não contribuíram para o aumento nos teores de macronutrientes foliares em comparação com o tratamento com fertilização mineral. Resultados diferentes deste trabalho foram encontrados por Guedes e Poggiani (2003) em relação a N, porém semelhantes em relação a P. Os autores utilizaram diferentes doses de biofóssido condicionados com cal hidratada e cloreto férrico, aplicando nas entrelinhas de plantio. Eles afirmam que o N está prontamente disponível na aplicação do lodo de esgoto, porém, o P está imobilizado na matéria orgânica e demora a ficar disponível para a planta, além de ser praticamente imóvel no solo. Apesar da adubação de plantio com biofóssido nesse trabalho ter ocorrido de forma localizada na cova, a mineralização desse nutriente parece não ter ocorrido de forma satisfatória para elevar os teores desse nutriente nas folhas das espécies florestais nativas, com exceção na espécie *P. dubium*. Embora os teores nutricionais foliares terem sido menores nos tratamentos com biofóssido, essa diferença não se traduziu em menor crescimento para as variáveis avaliadas, principalmente para as espécies *S. terebinthifolius*, *L. glyptocarpa* e *P. dubium*, sugerindo um aumento da eficiência de uso de nutrientes por essas espécies.

Espera-se um bom desenvolvimento da planta quando o teor foliar de K encontra-se entre os valores de 5 a 20 g.Kg<sup>-1</sup> (LARCHER, 2000). Portanto, os valores encontrados para todos os tratamentos e espécies encontram-se dentro da faixa recomendada pelo autor. Esses resultados demonstram que apesar do biofóssido normalmente apresentar valores baixos de K, em função das perdas desse nutriente durante o processo de lavagem no tratamento desse material (BERTON & NOGUEIRA, 2010), a quantidade fornecida foi adequada para as plantas até a idade avaliada. Silva et al. (2008), conduziram experimento com adubação para *Eucalyptus grandis* em Itatinga, SP, em um Latossolo-Amarelo de baixa fertilidade, no qual encontrou resultados insuficientes de K nos tratamentos com biofóssido, portanto, os autores recomendam que esse tipo de adubação seja complementada com fontes de K e B antes da aplicação. Estes resultados diferem dos encontrados nesse experimento, mostrando que o biofóssido utilizado apresenta uma qualidade diferenciada para esse nutriente.

Epstein & Bloom (2004) determina um valor de 5 g.Kg<sup>-1</sup> como valor de referência para cálcio. Alguns autores explicam que o baixo teor de cálcio nas plantas pode ser explicado pela interação com altas concentrações de K, Mg e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> na zona de absorção pelas raízes das plantas (CUNHA et al., 2006; VITTI et al., 2006; TAIZ & ZEIGER, 2009). Neste trabalho, esperava-se que com o aumento das doses de biofóssido a absorção de cálcio fosse comprometida (devido a concentração maior de nitrogênio), porém não foi o que ocorreu, sendo em grande parte o teor nas doses maiores de biofóssido serem maiores do que nas doses menores. Duboc (2005) corrobora os dados encontrados nesse trabalho, visto que em seu estudo, o mesmo encontrou valores de cálcio menores nas maiores doses de adubação nitrogenada.

Valores de referência de Mg foram encontrados por Larcher (2000) variando de 1 a 3 g.Kg<sup>-1</sup> de massa seca. Para Malavolta (1997), existe um efeito sinérgico entre absorção de P e Mg, porém, os resultados apresentados por esse trabalho não são explicados por essa afirmação do autor. Porém, Pandovani (2006), verificando o comportamento do Mg na espécie *Inga uruguensis*, verificou a relação entre P e Mg, ou seja, quando verificou valores baixos de fósforo, também constatou valores menores de Mg. Vale ressaltar que a o fósforo atua como ativador de ATPase de membrana e o Mg compõe a estrutura molecular da clorofila (LIMA FILHO, 2015). Nesse trabalho os teores de P e Mg não apresentaram relação entre si, portanto, pode-se concluir que esse comportamento sinérgico pode variar em função das necessidades nutricionais de espécie para espécie.

Os valores de referência de S na literatura podem variar. Vitti et al. (2006) dizem que os valores de referência para esse nutriente está compreendido ente 1 e 5 g.Kg<sup>-1</sup>, já Epstein & Bloom (2004) afirmam que o valor de referência de S é em torno de 1 g.Kg<sup>-1</sup>. Brun et al. (2008) relaciona a disponibilidade de S com a qualidade e quantidade de matéria orgânica disponível, sendo esse tipo de material uma de suas principais fontes na natureza. Isso explica os maiores valores desse nutriente com o aumento das doses de bio sólido, consequentemente de matéria orgânica na cova de plantio, observados neste estudo.

## 7. CONCLUSÕES

A aplicação de doses de até 4 L/cova não afetou a sobrevivência de espécies arbóreas da Mata Atlântica plantadas em um Planossolo Háplico. Porém, a aplicação de fertilizante mineral reduziu drasticamente o percentual de sobrevivência das espécies *S. multijuga*, *I. laurina* e *L. glyptocarpa*, mas esse efeito pode estar associado a uma redução do potencial osmótico do solo, provocado, principalmente, pelo período de déficit hídrico pré e pós-plantio.

A aplicação de biossólido promoveu efeitos distintos sobre o crescimento das espécies arbóreas nativas estudadas. O efeito foi positivo sobre o crescimento de *S. terebinthifolius*, *L. glyptocarpa* e *P. dubium*, mas a dose ideal variou para cada espécie. Ao contrário, a aplicação de biossólido não influenciou significativamente o crescimento de *S. multijuga* até 4 L/cova, mas prejudicou essa espécie quando foi aplicado 8 L/cova de biossólido.

As doses de biossólido, de forma geral, não contribuíram para o aumento dos teores de nutrientes foliares, porém, para as espécies *S. terebinthifolius*, *L. glyptocarpa* e *P. dubium* isso não foi fator limitante para redução no crescimento, quando estas foram comparadas ao tratamento com fertilizante mineral equivalente a dose de 4 L de biossólido.

Recomenda-se cautela quanto ao uso de fertilizantes minerais em plantios com espécies nativas, pois o déficit hídrico pós-plantio pode retardar o crescimento ou ocasionar mortalidade de mudas de determinadas espécies.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. H. M. **Biossólido na produção de mudas florestais**. 2014, 78f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Aprova o regulamento do programa de Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES para o exercício de 2015 e dá outras providências. Resolução nº 601, de 25 de maio de 2015**. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2015/601-2015.pdf>. Acessado em: 18 de setembro de 2015>.
- ALAMINO, R. C. J. **Utilização de lodo de esgoto como alternativa sustentável na recuperação de solos degradados: Viabilidade, avaliação e biodisponibilidade de metais**. 2010, 221f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ALVES, R. **PRODES seleciona estações de tratamento de esgoto para 20 milhões em investimentos. Matéria publicada no site da Agência Nacional de Águas (ANA) em 28 de maio de 2015**. Disponível em: [http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id\\_noticia=12726](http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=12726). Acessado em: 18 de setembro de 2015>.
- ANDREOLI, C. V. TAMANIN, C. R.; HOLSBACH, B.; PEGORINI, E. S.; NEVES, P. S. **Uso de lodo de esgoto na produção de substrato vegetal. In: Biossólidos – alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: Editora ABES, 2006. 398p.
- ANDREOLI, C. V.; SPERLING, V. M.; FERNANDES, F. **Lodos de esgoto: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484p.
- ANDREOLI, C. V. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura e sua influência em características ambientais no agrossistema**. 1999, 121f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERREIRA, A. C.; BONNET, B. R. P.; PEGORINI, E. S. **R G K I A Gestão dos biossólido gerados em estações de tratamento de esgoto doméstico. Engenharia e Construção**, Curitiba, n. 24, setembro, 1998.
- ASSENHEIMER, A. **Benefícios do uso de biossólido como substratos na produção de mudas de espécies florestais. Ambiência – Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**. Guapuruvu, PR, v. 5, n. 2, maio/agosto. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 12.209: **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro, 2001. 53p
- BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J. **Uso agrícola do lodo de esgoto: influências nas propriedades químicas e física do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. Semina – Ciências Agrárias**, Londrina, v. 27, n. 4, p. 565-580, 2006.
- BARNETO, A. G.; CARMONA, J. A.; ALFONSO, J. E. M.; BLANCO, J. D. **Kinetic models based in biomass components for the combustion and pyrolysis of sewage sludge ad its compost. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Sidney. v. 86, p. 108-114, 2009.

- BERTON, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R. Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a resolução n° 375 do CONAMA**. Botucatu: FEPAF, 2010. Cap. 2, p. 31-50.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. Lodo de esgoto: Impactos ambientais na agricultura. **Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente**, 2006. 349p.
- BETTIOL, W.; CARVALHO, P. C. T. Utilização de lodo de esgoto primário e fertilizante organo-mineral IPT na cultura do milho. **Fertilizantes**, 44:14-15, 1982.
- BIELSCHOWSKY, M. C. **Modelo de gerenciamento de lodo de estação de tratamento de esgotos: aplicação do caso da Bacia da Baía de Guanabara**. 2014 167f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica & Química da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- BITTON, G. Wastewater microbiology. **New York: Ed. Wiley**, 2001. 381p.
- BORGES, T. A.; SILVA, C. M.; BALDUÍNO, A. P. C.; SOARES, J. A.; PEREIRA, B. C. E. Uso de lodo de esgoto na recuperação de área degradada no Distrito Federal. **Revista AIDIS**, Juruquilla, v. 2, n. 1, p. 65-75, 2009.
- BRASIL, Lei n° 11.428 de 22 de dezembro de 2006. **Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2004-2006/2006/lei/111428.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2004-2006/2006/lei/111428.htm). Acessado em 13 de outubro de 2016.
- BRASIL, Lei n° 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a política nacional de resíduos sólidos**. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acessado em: 27 de setembro de 2015.
- BRASIL, Lei n° 12.651 de 25 de maio de 2012. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa**; altera as leis nos 6.938 de 31 de agosto de 198, 9.393 de 19 de dezembro de 1996 e 11.428 de 22 de dezembro de 2006; revoga as leis nos 4.771 de 15 de setembro de 1965, 7.754 de 14 de abril de 1989 e a Medida Provisória n° 2.166-67 de 24 de agosto de 2001, e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/112651.htm). Acessado em 13 de outubro de 2016.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução – CONAMA. Resolução n° 375/2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n.167, p. 141-146, 30 de agosto de 2006.
- BRUN, F. G. K. et al. Aspectos nutricionais de exemplares de guabiju (*Myrcianthes pungens* (Berg) Legrand) implantados na arborização viária de Santa Maria- RS. **Projeto de Pesquisa**, Santa Maria, v; 2. p. 7-15, 2008
- CALDEIRA JR, C. F.; SOUZA, R. A.; SANTOS, A. M. SAMPAIO, R. A.; MARTINS, E. R. Características químicas do solo e crescimento de *Astronium fraxinifolium* Schott em área degradada adubada com lodo de esgoto e silicato de cálcio. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 2, p. 213-218, 2009.
- CALDEIRA, M. V. W.; PERONI, L.; GOMES, D. R.; DELARMELINA, W. M.; TRAZZI, P. A. Diferentes proporções de biossólido na composição de substratos para produção de

- mudas de timbó (*Ateleia glazioveana* Baill.). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 93, p. 015-022, março, 2012.
- CAMPOS, F. S.; ALVES, M. C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 32:1289-1397, 2008.
- CARPANEZZI, A. A.; BRITO, J. O.; FERNANDES, P.; JARK FILHO, W. Teor de macro e micronutrientes em folhas de diferentes idades de algumas essências florestais nativas. **Anais da E.S.A. “Luiz de Queiroz” Piracicaba**, v. 23, 1976, p.225-232.
- CASTILHO JR, A. B.; PRIM, E. C. C. PRIMENDEL, F. J. G. Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. **Estudos Tecnológicos**, São Leopoldo, v. 7, n. 2, p. 86-97, 2009.
- COLODRO, G.; ESPÍNDOLA, C. R.; CASSIOLATO, A. M. R.; ALVES, M. C. Atividade microbiana em um Latossolo degradado tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 2, p.195-198, 2007.
- COLODRO, G.; ESPÍNDOLA, C. R. Alterações na fertilidade de um Latossolo degradado em resposta à aplicação de lodo de esgoto. **Acta Scientiarum Agronomy**, 29: 1-15, 2006.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.** Diário oficial da União. Brasília, DF, 30 de agosto de 2006. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acessado em 24 de outubro de 2016.
- CUNHA, A. M.; CUNHA, G. M.; SARMENTO, R. A.; CUNHA, G. M.; AMARAL, J. F. T. Efeito de diferentes substratos sobre o desenvolvimento de mudas de *Acacia sp.* **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 207-214, 2006.
- DIAS, L. E.; FARIA, S. M.; FRANCO, A. A. Crescimento de mudas de *Acacia mangium* Wild, em resposta à omissão de macronutrientes. **Revista Árvore**, v. 18, n. 2, p. 123-131, 1994.
- DUBOC, E. **Desenvolvimento inicial e nutrição de espécies arbóreas nativas sob fertilização, em plantios de recuperação de áreas de Cerrado degradado.** 2005, 173f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. Londrina: **Planta**. 2004. 2º Edição. 635p.
- FARIA, L. C. **Uso do lodo de esgoto (biossólido) como fertilizante em eucaliptos: demanda potencial, produção e crescimento das árvores e viabilidade econômica.** 2007, 106f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- FERRAZ, A. V. **Ciclagem de nutrientes e metais pesados em plantios de *Eucalyptus grandis*, adubados com lodo de esgoto produzidos em diferentes estações de tratamento da região metropolitana de São Paulo.** 2009, 122f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- GONÇALVES, J. L. M.; VAZM L. M. S.; AMARAL, T. M.; POGGIANI, F. Aplicação de lodo de esgoto em plantações florestais: efeitos na fertilidade do solo, nutrição e

- crescimento das árvores. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Eds.) **Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. P.179-195.
- GONÇALVES, J. L. M.; Relatório de pesquisas sobre nutrição mineral de espécies nativas. Piracicaba, **Convênio CESP-ESALQ-IPEF**. 1994. 25p.
- GUEDES, M. C.; ANDRADE, C. A.; POGGIANI, F.; MATTIAZZO, M. E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, Viçosa, Março/Abril, 2006.
- GUEDES, M. C. **Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido sobre Latossolo cultivado com *Eucalyptus grandis***. 2005, 154f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- GUEDES, M. C.; POGGIANI, F. Variação dos teores de nutrientes foliares em eucalipto fertilizado com biossólido. **Scientia Forestalis**, 63:188-201, 2003.
- GUEDES, M. C. **Efeito do lodo de esgoto (biossólido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantação de eucalipto**. 2000, 74f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- GUERRINI, I. A.; VILLAS BOAS, R. L.; BENEDETTI, V.; COMERIO, J.; MORO, L. Application of wood ash pulp and paper sludge to *Eucalyptus grandis* in tree Brazilian soils. In: HENRY, C.L.; HARRISON, R. B.; BASTIAN, R. K. **The Forest Alternative Principles and Practice of Residuals Use**. Seattle: College of Forest Resources, University of Washington, 2000. P. 127-131.
- HALLEY, E.; MILLER, G. A. Backward approach to sludge management. **Water Engineering & Management**. v. 9, p. 36-39, 1991.
- HOSSAIN, M. K.; STREZOV, V.; NELSON, P. F. Thermal characterization of the products of wastewater sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Sydney. V. 85, p. 442-446, 2009.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados climáticos da Estação Automática Ecologia Agrícola, Seropédica, Km 47-RJ**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>. Acesso em 18/01/2017.
- LARCHER, W. A. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. 531p.
- LESSA, G. T. **Contribuição ao estudo da viabilidade da utilização de lodo de estação de tratamento biológico de esgoto misto na construção civil**. 2005, 135p. Mestrado (Mestrado profissional em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- LIMA FILHO, P. **Biossólido na restauração florestal: formação de mudas e adubação de plantio**. 2015, 88p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- LUDUVICE, M. **Processos de estabilização de lodos**. In: **Lodos de esgotos – tratamento e disposição final**. Rio de Janeiro: Ed. ABES, 2001. 484p.
- MACHO, S. A.; FILHO, A. F. **Dendrometria**. 2. Ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2006.

- MAIO, M. M.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; PRAES, F. B. S.; RODRIGUES, M. N.; SILVA, H. P.; DIAS, A. N.; FREITAS, C. E. Atributos físicos do solo, adubado com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 6, p. 823-830, novembro/dezembro, 2011.
- MARIA, I. C.; CHIBA, M. K.; COSTA, A.; BERTON, R. S. Sewage sludge application to agricultural land as soil physical conditioner. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, maio/junho, 2010.
- MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.
- METCALF; EDDY, INC. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. New York: ed. McGraw-Hill, 2002. 1334p.
- MIKI, M. K.; ALEM SOBRINHO, P.; VAN HAANDEL, A. C. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. In: **Biossólidos: Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006.
- MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell & Environment**, v. 25, p. 239-250, February, 2002.
- NETO, S. P. M.; ABREU JÚNIOR, C. H.; MURAOKA, T. **Uso de biossólido em plantios florestais**. EMBRAPA Cerrados, Planaltina, DF, 2007.
- OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; ROSSETTO, R. Efeito de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um Latossolo Amarelo Distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:505-519, 2002.
- PAIVA, A. V.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. M.; FERRAZ, A. V. 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, dezembro, 2009.
- PANDOVANI, V. C. R. **Composto de lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de árvores nativas e exóticas**. 2006, 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade de Campinas, Campinas, 2006.
- PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, n. 16, p. 89-XX, julho/dezembro, 2010.
- POGGIANI, F.; GUEDES, M. C.; BENEDETTI, V. 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, dezembro de 2009.
- POGGIANI, F.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade do lodo de esgoto urbano em plantações de eucalipto. **Silvicultura**, São Paulo, v. 80, p. 48-52, 1999.
- POGGIANI, F. **Aplicação de biossólido em plantas florestais**. (ESALQ/USP) 1998, Projetos de Pesquisa.



- ROCHA, G. N.; GONÇALVES, J. L. M.; MOURA, I. M. Mudanças da fertilidade do e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com bio-sólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 28, n. 4, p. 623-639, 2004.
- ROSA, P. B.; SCHOEDER, P. **Avaliação do impacto da secagem térmica nos custos com disposição em aterros sanitários do lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto de uma metrópole**. 2009. 77f. Monografia (Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SAMPAIO, T. F.; GUERRINI, I. A.; BACKES, C.; HELIODORO, J. C. A.; RONCHI, H. S.; TANGANELLI, K. M.; CARVALHO, N. C.; OLIVEIRA, F. C. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36:1637-1645, 2012.
- SANTOS, F. M. **Produção de biomassa e eficiência de uso dos nutrientes em plantios puros e mistos de *Eucalyptus urograndis* e *Acácia mangium* Willd.** 2015. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- SELIVANOVSKAYA, S. Y.; LATYPOVA, V. Z.; ARTOMANOVA, L. A. Use of sewage sludge compost as the restoration agent on the degraded soil of Tatarstan. **Journal of Environmental Science and Health-Part A**, New York, v. 38, n. 8, p. 1549-1556, 2003.
- 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 degradadas por pastagem. **Revista Agrogeoambiental**, abril, 2010.
- SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; MOREIRA, R. M. 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.
- SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; BERNARDES, E. M. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília. V. 36, n. 5, p. 831-840, maio, 2001.
- SIMONETE, M. A.; KIEHL, J. C.; ANDRADE, C. A.; TEIXEIRA, C. F. A. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**. V. 38, n. 10, p. 1187-1195, outubro, 2003.
- SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2014**, SNSA/MCIDADES, Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, 2016.
- SOARES, M. R. **Coefficiente de distribuição (kd) de metais pesados em solos do estado de São Paulo**. 2004. 202f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo: 2004.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4ª Edição. 2009, Porto Alegre: Artmed, 2009, 848p.
- TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na<sup>+</sup> tolerance and Na<sup>+</sup> transport in higher plants. **Annals of Botany**, 91 (5): 503-527, April, 2003.
- VAN HAANDEL, A. C.; ALEM SOBRINHO, P. Produção, composição e constituição de esgoto. In: **Biossólidos – Alternativas de uso de resíduos de saneamento**. Rio de Janeiro: Editora ABES, 2006. 417p.

- VAN HAANDEL, A. C.; MORAIS, G. V. R. **O comportamento do sistema de lodo ativado**. Campina Grande: Epgraf, 1999.
- VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. 2006, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006, p. 299-326.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Rio de Janeiro: Ed. ABES, 2002. 243p.