UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

ISABELA CRISTINA GOMES PIRES

Lodo de esgoto em plantio de *Eucalyptus grandis*: produção de madeira e viabilidade econômica

Piracicaba
2015

ISABELA CRISTINA GOMES PIRES

Lodo de esgoto em plantio de *Eucalyptus grandis*: produção de madeira e viabilidade econômica

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Dissertação apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Cassio Hamilton Abreu Junior

Piracicaba

2015

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Pires, Isabela Cristina Gomes

Lodo de esgoto em plantio de *Eucalyptus grandis*: produção de madeira e viabilidade econômica / Isabela Cristina Gomes Pires; orientador Cássio Hamilton Abreu Junior. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.

88 p.: il.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Economia florestal 2. Eucalipto 3. Lodo de esgoto (Uso agrícola) 4. Madeira (Produção) 5. Nutrição vegetal de plantas 6. Resíduos sólidos I. Título

CDU 628.381 : 674.031.776.2

Dedico a conclusão desta etapa à minha família

AGRADECIMENTOS

Ao professor Cassio Hamilton Abreu Junior, pela orientação, compreensão e amizade;

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), pela oportunidade;

À CAPES, pela bolsa concedida durante o curso de mestrado;

À Suzano Bahia Sul Papel e Celulose S.A., pela área experimental, logística de trabalho e financiamento;

Aos funcionários da Suzano, José Luiz Gava e Joel Madella, pelo constante apoio durante o desenvolvimento do trabalho;

Ao pesquisador Sebastião Pires de Moraes Neto, pelo esforço e dedicação durante a instalação do experimento e primeiras amostragens;

À Dra. Lucia Pittol Firme, pelo apoio, sugestões e informações sobre o histórico do experimento e instruções para a realização deste trabalho, e, principalmente, pela amizade e pelo carinho.

Ao Dr. Marcelo Alves, funcionário do CIAGRI/USP, pela colaboração para o desenvolvimento da análise estatística;

Ao Dr. Mauro Osaki, funcionário do CEPEA/USP, pela colaboração no levantamento de custos e ao Dr. Sérgio De Zen, funcionário do CEPEA/USP e professor do Departamento de Economia, Administração e Sociologia da ESALQ/USP, pelas sugestões;

Ao Fernando Carvalho Oliveira, da Biossolo Agricultura & Ambiente, pela atenção e pelas informações repassadas para o levantamento de custo deste trabalho;

À equipe da CPG/CENA, em especial a Daiane e Fábio pela paciência e assistência;

À técnica do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas do CENA, Cleusa Pereira Cabral, pela atenção, dedicação e amizade;

À bibliotecária Marília Ribeiro Garcia Henyei pelas correções e formatação desta dissertação e ao amigo Romeu pela tranquilidade transmitida;

Ao motorista Oldack pela ajuda durante o trabalho de campo;

Aos meus amigos de pós-graduação, Lucia Firme, Camila Marcon, Felipe Villanueva, Tiago Nogueira, Renato, Bruno, Fernando, Élcio, Cris, Felipe, Aline e Alinne, pela amizade;

À Mimi pela calma, ao Tuco pela persistência, a Trusca pela força e ao Rufino pela piada;

À Ailine, Esperança, Sula e Anomeado e à Alinne por me recolherem em suas residências e pela amizade;

À minha irmã, Luciana Gomes Pires, à minha mãe, Magnólia de Luciê Gomes Pires, ao meu pai, Paulo Cândido Pires, ao meu cunhado, William Henrique Guindani e à minha sobrinha, Alice Pires Guindani, pelo carinho, paciência e ajuda prestada durante todo o processo, desde a seleção para o mestrado até o depósito da dissertação;

A todos aqueles que direta e indiretamente auxiliaram na execução deste trabalho;

Ao Gregori da Encarnação Ferrão, meu namorado, marido e companheiro (e)terno, pela paciência e pela sabedoria construída em nosso lar que contribuíram para a finalização desta dissertação;

Ao Heitor Pires Ferrão, meu filho, por me possibilitar conhecer esse novo tipo de amor e por me transcender a plenitude da felicidade.

RESUMO

PIRES, I. C. G. **Lodo de esgoto em plantio de *Eucalyptus grandis*: produção de madeira e viabilidade econômica**. 2015. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

O lodo de esgoto (LE) aplicado em solos de florestas plantadas, com base no critério do nitrogênio, pode aumentar a produção de madeira sem causar danos ao ambiente florestal. Entretanto, há necessidade de pesquisas para avaliar o aproveitamento dos nutrientes contidos no LE e para recomendar um manejo adequado em relação a sua aplicação no solo complementada pela fertilização mineral, considerando-se os aspectos de produtividade e econômico. Assim, objetivou-se analisar o efeito das combinações de doses de LE e de fertilizante mineral nitrogenado e fosfatado sobre a produção de biomassa seca e de volume de madeira de *Eucalyptus grandis* após 95 meses do uso do lodo, e avaliar a viabilidade econômica da recomendação de LE e de sua complementação com adubo mineral nitrogenado e fosfatado para o produtor florestal. O experimento foi instalado em área comercial da Suzano, em Angatuba-SP, aplicando-se doses de lodo (0; 7,7; 15,4 e 23,1 Mg ha^{-1}, base seca), e de fertilizante mineral nitrogenado (0; 46,9; 95,1 e 142 kg ha^{-1}), fosfatado (0; 27,7; 55,9 e 84 kg ha^{-1}, P_2O_5), e potássico (175 kg ha^{-1} de K_2O para todos os tratamentos, devido ao baixo teor deste nutriente no lodo); em delineamento em blocos ao acaso, em esquema fatorial 4x4x4, totalizando 128 parcelas. Para o objetivo específico do presente estudo, efeito das doses de lodo, foram tomadas aleatoriamente combinações de doses de N e P e dentre dessas foram estudadas todas as doses de LE aplicadas, totalizando 52 parcelas. A produção de biomassa seca e de madeira, calculada pela equação de Smalian, foram determinadas a partir de medidas coletadas aos 95 meses após 8 anos do plantio do eucalipto. Os valores de receita e de custos foram levantados no ano de referência de 2013. Para a avaliação da viabilidade econômica, utilizou-se o método do valor presente líquido anualizado (VPLA), considerando-se taxas de juros de 6 e 12% ao ano e que o produtor florestal arcaria com 0 ou 100% do custo do transporte do LE. Houve efeito linear das doses de LE sobre a produção de biomassa seca de lenho, casca, folha e galho e de volume de madeira. O LE na dose de 23,1 Mg ha^{-1} de LE, equivalente a 150% da dose de LE recomendada pelo critério do nitrogênio, propiciou a maior produção de matéria seca total, 187 Mg ha^{-1}, e de tronco, 173 Mg ha^{-1} e de volume, 529 m^3 $ha^{-1,}$ com incremento médio anual de 66 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. Ao considerar o critério para a aplicação de LE, com base em N, e que o produtor florestal arcou com todo o custo de transporte deste resíduo, observou-se que o tratamento com maior retorno econômico foi o que utilizou a dose de 15, 4 Mg ha^{-1} de LE e 84 kg ha^{-1} P_2O_5 a taxas de juros de 6% a.a.; e aquele que aplicou 7,7 Mg ha^{-1} de LE e 28 kg ha^{-1} P_2O_5 a taxas de juros de 12% a.a. Quando o produtor florestal foi isento do custo de transporte do LE, o tratamento mais viável economicamente foi o que usou doses de 15,4 Mg ha^{-1} de LE e 84 kg ha^{-1} P_2O_5 para taxas de juros de 6 e 12% a.a.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. *Eucalyptus grandis*. Nutrição mineral de plantas. Produção de madeira. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

PIRES, I. C. G. **Sewage sludge in planting *Eucalyptus grandis*: wood production and economic viability**. 2015. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

The sewage sludge (SS) applied in planted forest soils, based on the nitrogen criterion, may increase the production of wood without causing damage to the forest environment. However, there is a need for research to evaluate the use of nutrients contained in the SS and to recommend appropriate management regarding for its application on soil using mineral fertilizer supplements by aspects of productivity and economic. The objective were to analyze the effect of combinations of sewage sludge doses and nitrogen and phosphate mineral fertilizer on the production on dry matter content and wood production of *Eucalyptus grandis* at 95 months after planting, and to evaluate the economic viability of SS recommendation and its complementation with nitrogen and phosphate mineral fertilizer for the forest producer. The experiment was installed in a commercial area of Suzano, in Angatuba-SP, sludge doses are applying (0, 7.7, 15.4 and 23.1 Mg ha^{-1}, dry base), and nitrogen mineral fertilizer (0; 46.9; 95.1 and 142 kg ha^{-1}), phosphate (0, 27.7, 55.9 and 84 kg $^{-1}$ P_2O_5), and potassium (175 kg ha^{-1} K_2O for all treatments, due to the low content of this nutrient in SS); in a randomized block design in a factorial 4x4x4. For the specific purpose of this study, combinations were taken in doses of N and P and among all these SS doses were studied. The production of dry matter and wood, calculated by equation Smalian were determined from measurements collected at 95 months post-planting eucalyptus. The revenue and cost values were raised in the reference year 2013. For the evaluation of the economic viability, we used the method of annualized net present value (ANPV), considering 6 and 12% per year discount rates and that the forest producer would bear 0 or 100% of the cost of transport of sewage sludge. There was a linear effect of SS doses on the production of dry biomass of wood, bark, leaf and branches and wood volume. The dose of 23.1 Mg ha^{-1} SS, equivalent to 150% of SS dose recommended by the criterion nitrogen, provided the highest total dry matter, 187 Mg ha^{-1}, and wood+bark of 173 Mg ha^{-1} and stem volume of 529 m^3 ha^{-1}, with average annual increment of 66 m^3 ha^{-1} yr^{-1}. When considering the criterion to the application of SS, based on N, and the forestry producer has borne all the shipping cost of this waste, it was observed that the highest economic return treatment was that using a dose of 15.4 Mg ha^{-1} SS and 84 kg ha^{-1} P_2O_5 to 6% per year discount rate; and one that applied 7.7 Mg ha^{-1} SS and 28 kg ha^{-1} P_2O_5 to the interest discount rate to 12% per year rate. When the forest producer was exempted to pay the SS shipping cost, the most economically viable treatment was what used 15.4 Mg ha^{-1} doses of SS and 84 kg ha^{-1} P_2O_5 to 6 and 12% per year discount rates.

Keywords: Sludge sewage. *Eucalyptus grandis*. Mineral nutrition of plants. Wood production. Economic viability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características químicas do solo da área experimental, antes da instalação do experimento 43

Tabela 2 - Características químicas e físicas do lodo de esgoto utilizado no experimento e concentrações máximas de elementos inorgânicos permitidas pela Resolução CONAMA nº 375 (CONAMA, 2006) para o uso agrícola do lodo de esgoto 45

Tabela 3 - Cronograma de aplicação dos adubos minerais nitrogenado, fosfatado e potássico no manejo da adubação do solo da área experimental..... 47

Tabela 4 – Biomassa seca de lenho (BSLe), de casca (BSC), de galho (BSG), de folha (BSF) e biomassa seca total (BST) aos 95 meses após o plantio do eucalipto, em função das doses de lodo de esgoto aplicadas no plantio, e as porcentagens que cada componente representa em relação a biomassa total..... 55

Tabela 5 – Biomassa seca de tronco e seu incremento médio anual (IMA) aos 95 meses após o plantio de eucalipto em função da dose de lodo..... 58

Tabela 6 – Altura comercial aos 95 meses pós-plantio dos eucaliptos, em função da dose de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado 59

Tabela 7 – Volume de madeira com casca e seu incremento em relação ao controle aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto (L) e de adubo mineral fosfatado (P) 62

Tabela 8 – Incremento médio anual (IMA) aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado..... 64

Tabela 9 – Receita total e adicional obtida aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado..... 69

Tabela 10 – VPLA´s aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado, considerando taxa de juro de 6 % a.a. 70

Tabela 11 – VPLA´s aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado, considerando taxa de juro de 12 % a.a..... 72

Tabela 12 – VPLA´s aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado, considerando que o produtor florestal é isento do custo de transporte e a taxa de juro é de 6 % a.a. 74

Tabela 13 – VPLA´s aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado, considerando que o produtor florestal é isento do custo de transporte e taxa de juro de 12 % a.a. 75

Tabela 14 – Maior valor de VPLA para cada cenário aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos 76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Atendimento e déficit em esgotamento sanitário em proporção da população do Brasil em 2008 (PLANSAB, 2013). 19

Figura 2 - Necessidades de investimentos em expansão e reposição em abastecimento de água potável e esgotamento sanitário no Brasil, de 2011 a 2030 em % (PLANSAB, 2013). 20

Figura 3 - Distribuição geográfica de áreas cultivadas com eucalipto no estado de São Paulo, 2007/2008 (SÃO PAULO, 2008) 26

Figura 4 - Biomassa seca total em função da dose de lodo de esgoto 57

Figura 5 – Composição do custo, em porcentagem, para a adubação mineral convencional no experimento em estudo. 66

Figura 6 – Composição do custo, em porcentagem, para a aplicação de três doses de lodo de esgoto usadas no experimento em estudo. 67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 17
2. REVISÃO DE LITERATURA 18
2.1. Lodo de Esgoto 18
2.2. Lodo de esgoto em área agrícola 21
2.3. Lodo de esgoto em plantio florestal 25
2.4. Produção de madeira em plantio de eucalipto com aplicação de lodo de esgoto 30
2.5. Viabilidade econômica da aplicação de lodo de esgoto em sistema agrícola 34
2.6. Viabilidade econômica da aplicação de lodo de esgoto em sistema florestal 37
3. HIPÓTESES 41
4. OBJETIVO 42
5. MATERIAL E MÉTODO 43
5.1. Descrição da área experimental 43
5.2. Caracterização do lodo de esgoto 43
5.3. Plantio e tratos culturais 46
5.4. Tratamentos e delineamento experimental 47
5.5. Amostragem destrutiva de árvores 48
5.6. Avaliação da viabilidade econômica 49
5.7. Análise estatística dos resultados 54
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO 55
6.1. Biomassa da parte aérea dos eucaliptos 55
6.2. Volume de madeira 59
6.3. Avaliação da viabilidade econômica 66
7. CONCLUSÃO 77
REFERÊNCIAS 78

1. INTRODUÇÃO

O Lodo de esgoto (LE) é um resíduo gerado no tratamento de águas residuárias (esgoto doméstico) em Estações de Tratamento de Esgoto. Há algumas alternativas de destinação deste resíduo como, aplicação em áreas agrícolas. Esta prática contribui para o fornecimento de macro e micronutrientes para a nutrição da planta, além de propiciar melhorias físicas, químicas e biológicas no solo com a introdução de matéria orgânica.

A aplicação de LE, com concentração de patógenos e de elementos orgânicos e inorgânicos potencialmente tóxicos dentro do permitido pela legislação ambiental brasileira, em plantio florestal possui vantagens de não em disseminar contaminantes na cadeia alimentar, pois a matéria-prima é a madeira, e do aproveitamento dos nutrientes liberados pelo LE ao longo do tempo ser eficiente, sem prejudicar o ambiente florestal e a produção do volume de madeira.

Vários países, como EUA, Alemanha, França e Noruega, utilizam a maior parte do LE para fins agrícolas. Em paralelo, a viabilidade econômica do uso deste resíduo na agricultura, em substituição parcial ou total aos fertilizantes minerais, vem demonstrando resultados positivos.

A aplicação do LE na agricultura deve ser uma alternativa prioritária na gestão de resíduos onde há terras disponíveis, quando a qualidade do LE atende às exigências regulamentares e onde é aceitável socialmente. Nesse sentido, estudos sobre a aplicação de LE em plantio de eucalipto no estado de São Paulo focam na viabilidade do seu uso pelo aspecto agronômico, sanitário, social e ambiental.

De maneira geral, estes estudos vêm evidenciando o benefício do uso do LE em área florestal. Porém, a avaliação da viabilidade econômica do seu uso não mostrou resultado satisfatório, uma vez que o produtor florestal, que já utiliza o fertilizante mineral, não se sentiria motivado em aplicar LE no plantio de eucalipto, pois o seu retorno econômico com a adubação mineral convencional é maior quando comparado à aplicação de LE.

Diante do exposto, com o presente estudo, objetivou-se analisar a produção de madeira e a viabilidade econômica de um povoamento de *Eucalyptus grandis* aos 95 meses pós-plantio sob a aplicação de diferentes doses de LE e fertilizantes minerais nitrogenado e fosfatado. O intuito é indicar a recomendação de doses de LE, N e P economicamente viável para o produtor. Para tanto, avaliou-se a produção do volume de madeira de eucalipto e estipulou-se cenários nos quais o produtor florestal arcou com 0 ou 100% do custo de transporte de LE a taxas de juros de 6 e 12% ao ano (a.a.).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Lodo de Esgoto

Os resíduos sempre estiveram presentes na história da humanidade, porém com o crescimento populacional e o desenvolvimento de novas tecnologias no século XX, sua geração elevou-se significativamente, despertando o olhar da sociedade para a preocupação da gestão de resíduos.

Depois da Revolução Industrial, esta preocupação com o problema dos resíduos inicia-se sob a ótica da saúde humana, pois não havia uma atenção adequada à segregação, acondicionamento e destinação final dos resíduos, o que resultou em um ambiente propício para contaminações e disseminações de doenças tanto por agente patológico quanto por agente tóxico (PHILIPPI JUNIOR; ROMÉRO; BRUNA, 2004).

Posteriormente, na segunda metade do século XX, esta percepção se altera, assim a destinação adequada dos resíduos é marcada por uma mudança paradigmática, a qual considera que o mero crescimento econômico não corresponde mais as demandas sociais. Assim, a busca por conciliar o desenvolvimento integral, a preservação do ambiente e a melhoria da qualidade de vida tornam-se uma necessidade a ser sanada (MILARÉ, 2007).

No Brasil, com o objetivo de controlar o lançamento de poluentes em ambientes aquáticos, as águas residuárias (os esgotos) devem passar por tratamento, de modo a remover os agentes patogênicos e inorgânicos antes de serem devolvidos aos corpos de água. Tal prerrogativa é disposta na Resolução CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) n° 357 de 2005, que trata das condições e padrões de lançamento de efluentes no país (CONAMA, 2005).

A composição do esgoto pode variar de acordo com o local de origem (área residencial ou industrial), a época do ano e o processo utilizado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Geralmente, o esgoto doméstico é composto por 99,99% de água e 0,01% de sólidos; do total de sólidos, 70% são orgânicos e estão na forma de proteínas, carboidratos, gorduras, entre outros, e 30% são inorgânicos e correspondem a areia, sais, metais, entre outros (FERNANDES, 2000).

No tratamento do esgoto é gerado o LE. Este, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), é caracterizado como um resíduo sólido, sendo descrito da seguinte forma:

> material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

No Brasil, onde a prática de tratamento de esgotos é recente e pouco desenvolvida, a porcentagem de esgoto sanitário tratado não atinge os 50% do esgoto total produzido (Figura 1) em 2008, desse modo, a quantidade de resíduo gerado está abaixo do seu potencial de geração se toda a água residuária fosse tratada. Ainda assim, a geração de LE seco na região metropolitana de São Paulo foi de 295 t dia^{-1} em 2000 com previsão de produção de 749 t dia^{-1} para 2015 (TSUTIYA, 2001).

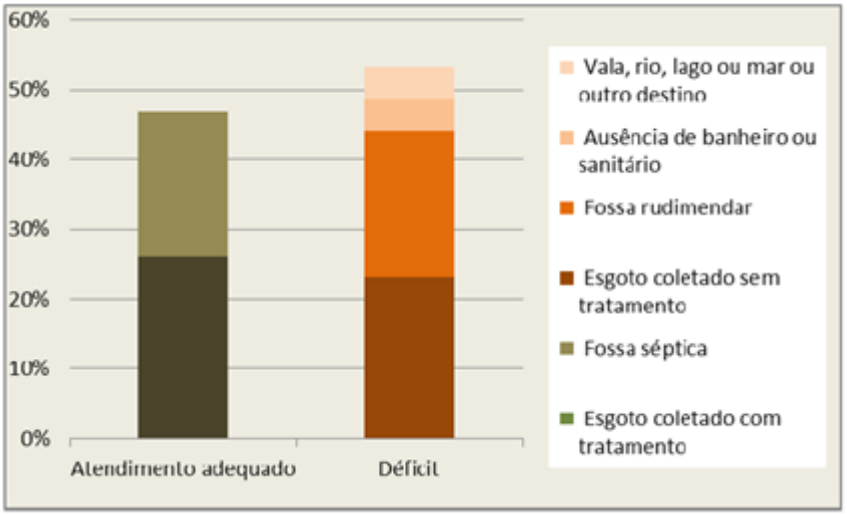

Figura 1 - Atendimento e déficit em esgotamento sanitário em proporção da população do Brasil em 2008 (PLANSAB, 2013).

Paralelamente, a preocupação com a gestão do LE intensifica-se, pois a versão preliminar do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB, 2013), em consonância com a Política Nacional de Saneamento Básico (BRASIL, 2007), prevê um aumento de 12,4% (Figura 2) no tratamento do esgoto doméstico até 2030, elevando, consequentemente, a quantidade de geração do LE.

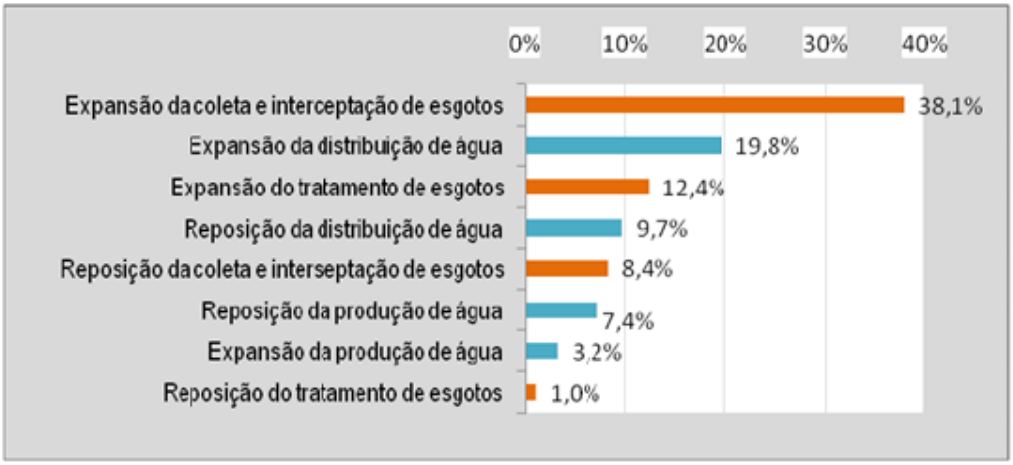

Figura 2 - Necessidades de investimentos em expansão e reposição em abastecimento de água potável e esgotamento sanitário no Brasil, de 2011 a 2030 em % (PLANSAB, 2013).

Neste trabalho, é utilizado o termo LE, pois facilita a comunicação em relação ao tipo de resíduo orgânico que está sendo estudado e segue o que preconiza a Resolução CONAMA n° 375. Dessa forma, o termo LE significa que o resíduo é gerado nos processos de tratamento de esgoto sanitário, não apresenta odores e vetores e apresenta concentrações de substâncias inorgânicas e patogênicas dentro dos limites estabelecidos (CONAMA, 2006).

As alternativas mais utilizadas para destinação final do LE são o uso agrícola, a disposição em aterro sanitário, o reuso industrial – produção de agregado leve, fabricação de tijolos e cerâmicas e produção de cimento –, a incineração, a recuperação de solos e a disposição oceânica (TSUTIYA, 2001). Sendo, esta última, considerada crime ambiental pela lei federal n° 9.605 de 1998, que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente (BRASIL, 1998). E a aplicação agrícola no estado de São Paulo não está ocorrendo (ABREU JUNIOR et al., 2008).

Segundo os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (BRASIL, 2010), a princípio, o LE pode ser reciclado ou disposto em aterro sanitário. Porém, em seu nono artigo fica evidente que esta Política priorizará a reciclagem em detrimento da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, pois:

> Art. 9° Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Contudo, analisando-se com mais cautela o artigo nono, pode-se afirmar que a PNRS não permite a destinação do LE para disposição final em aterro, uma vez que o lodo é um resíduo que possui alternativa de recuperação pela reciclagem e que tal Política averba que somente aquilo que não possui alternativa de reuso ou reciclagem pode ser disposto em aterro sanitário. Dessa forma, proíbe-se a disposição do LE em aterros.

Ademais, promover a destinação do LE a aterros sanitários incentivaria a implantação de novos aterros, o que levaria à necessidade de mais espaços, ao aumento dos custos financeiros intrínsecos a este tipo de projetos, ao impacto social, com possíveis conflitos com a população vizinha, e ao próprio risco ambiental em seu gerenciamento, em especial no manejo de chorume, que dificulta o seu licenciamento ambiental, e a emissão de metano, gás causador do efeito estufa (WANG et al., 2008; FIRME, 2009).

Portanto, considerando todas as prerrogativas acima descritas, é possível concluir que a reciclagem do LE é a disposição final ambientalmente mais adequada, uma vez que, este resíduo fornece nutrientes para as plantas pela reciclagem de sua matéria orgânica em solos agrícolas.

2.2. Lodo de esgoto em área agrícola

Em sistema agrícola produtivo, deve-se fornecer quantidade de nutrientes necessárias para as plantas, pois, geralmente, os solos não possuem características de fertilidade que atendam as demanda das culturas de regiões de clima tropical (ABREU JUNIOR et al., 2003). Ainda que o solo possua condições químicas ideais para a produção de uma cultura, há necessidade de repor os nutrientes exportados com a colheita (FERNANDES, 2000). Portanto, a intervenção antrópica na fertilidade dos solos é importante na produção agrícola.

Nesse contexto, a aplicação de LE em áreas agrícolas é considerada como uma alternativa de destinação ambientalmente adequada, pois possibilita a sua reciclagem, e possível no âmbito agronômico, posto que possui nutrientes necessários à nutrição mineral das plantas. A presença de matéria orgânica, macronutrientes (nitrogênio e fósforo) e micronutrientes (zinco) no LE potencializa o uso agrícola deste resíduo, uma vez que, funciona como condicionador das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, podendo complementar a adubação com fertilizantes minerais (SINGH; AGRAWAL, 2007; ABREU JUNIOR et al., 2005).

O efeito da aplicação de resíduo orgânico nos solos varia em relação ao tipo e características químicas e físicas do solo, das condições climáticas, da cultura utilizada e da frequência das aplicações (CASADO-VELA et al., 2006; BERTON; NOGUEIRA, 2010).

As áreas tropicais e subtropicais possuem solos intemperizados e com baixa capacidade de troca catiônica (CTC), assim com pouco potencial de armazenar nutrientes para as plantas. Portanto, a introdução de matéria orgânica por meio do LE possibilita a liberação lenta e gradual de nutrientes essenciais à nutrição mineral de planta, principalmente, nitrogênio (N), fósforo (P) e zinco (Zn) os quais são liberados para a solução do solo no processo de mineralização da matéria orgânica do LE, sendo, geralmente, deficitário em potássio (K) (POGGIANI; GUEDES; BENEDETTI, 2000; SIMONETE et al., 2003; RIBEIRINHO et al., 2012)

A aplicação de LE na agricultura pode beneficiar as características biológicas do solo. Um estudo sobre a qualidade de um Latossolo Vermelho-Escuro distroférrico, por meio de índices biológicos em quatro cultivos de milho consecutivos, constatou que a respiração basal, o carbono (C) e o N da biomassa microbiana, o quociente metabólico e a atividade enzimática no solo aumentam com a adição de LE e seus valores foram correlacionados positivamente com doses crescentes do resíduo (FERNANDES; BETTIOL; CERRI, 2005).

Alguns pesquisadores observaram que o uso de LE em áreas agrícolas pode contribuir com as propriedades físicas do solo. Assim, verificou-se que o uso do LE no solo aumentou a estabilidade dos agregados, a porosidade, o teor de húmus, a capacidade de reter água, entre outros (SINGH; AGRAWAL, 2007; MELO; MARQUES, 2000).

O lodo pode possuir características indesejáveis pelo cunho agronômico e ambiental, como, presença de organismos patogênicos, materiais orgânicos recalcitrantes, elevadas concentrações de elementos inorgânicos potencialmente tóxicos e de sais solúveis e desbalanço entre nutrientes (ANDRADE; MATTIAZZO, 2000; ABREU JUNIOR et al., 2005).

Porém, estas características podem ser trabalhadas de modo a evitar a contaminação do sistema solo-planta. Existem diferentes tratamentos para redução de patógenos, por exemplo, secagem térmica, digestão aeróbica e anaeróbica, estabilização com cal ou química, processo de pasteurização ou processos de irradiação com raios beta (CONAMA, 2006).

Em relação aos elementos inorgânicos potencialmente tóxicos, ao contrário dos patógenos, podem se acumular no solo ou contaminar águas subterrâneas quando lixiviados, além de, eventualmente, após absorção pelas raízes e transporte para a parte aérea das plantas,

entrarem na cadeia alimentar e causar danos à saúde humana e, ou, animal (ZHU; ALVA, 1993; MATTIAZO, 1994; ANDRADE; MATTIAZZO, 2000; ABREU JUNIOR et al., 2005).

Entretanto, ao estudar a aplicação de LE em solo tropical com fertilidade média em cana-de-açúcar, Nogueira et al. (2013) observaram que, apesar do aumento de elementos inorgânicos potencialmente tóxico (arsênio, cádmio, cobre, níquel, chumbo e zinco) na concentração do solo em curto prazo e a elevação da concentração destes elementos nas partes da planta, estas concentrações no solo foram inferiores aos valores de qualidade para os solos agrícolas estabelecido pela Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do estado de São Paulo (CETESB, 2005). Também ocorreu a elevação da concentração destes elementos nas partes aéreas das plantas, no entanto, os teores não foram capazes de gerar fitotoxidez.

Assim, diante dos estudos apresentados, as características indesejáveis do uso agrícola do LE podem ser contornadas, desde que na fase de planejamento do projeto agronômico sejam avaliados de maneira sistêmica, os seguintes itens: a) características da área onde será aplicado o LE; b) a composição do LE, como o nitrogênio disponível neste resíduo; c) tipo de cultura a receber o resíduo orgânico; d) taxa e frequência de aplicação a qual deve considerar o nitrogênio recomendado para a cultura (boletim técnico da região ou estado); e) observar os limites de carga total acumulada teórica no solo quanto à aplicação de substâncias inorgânicas; f) verificar o pH final da mistura solo-lodo para que não ultrapasse o limite de 7 (CONAMA, 2006).

Nos EUA, 50% do LE gerado é destinado para utilização em solo agrícola (SILVEIRA; ALLEONI; GUILHERME, 2003). A França, Itália, Suíça e Noruega aplicam 58, 33, 45 e 58 % do LE gerado na agricultura, respectivamente (POGGIANI; SILVA, 2005). De acordo com Lira, Guedes e Schalch (2008), muitos países, como a Alemanha, já utilizam em plantações florestais a maior parte ou 100% do lodo gerado.

No âmbito nacional, a regulação legal da aplicação do LE em área agrícola é regida pela Resolução CONAMA n° 375 (CONAMA, 2006), que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de LE gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Nesta Resolução constam as exigências necessárias para obter a permissão para aplicar LE em área agrícola pelo órgão ambiental responsável.

A Resolução n° 375 aborda aspectos de caracterização do LE; das restrições locacionais e da aptidão do solo das áreas de aplicação; do projeto agronômico e das condições de uso; da aplicação; do carregamento, transporte e estocagem; do monitoramento das áreas de aplicação deste resíduo (solo, águas subterrâneas e cursos d´água superficiais); dos processos para redução de agentes patogênicos e atratividade de vetores.

Nota-se a presença de obrigações com cunho técnico-operacional e administrativo no manejo do LE para uso agrícola.

Pesquisas voltadas para o uso de LE para fins agrícolas foram o alicerce para a elaboração desta Resolução. Observa-se o esforço em sugerir método de análise como a de amostragem de solo, cálculo do nitrogênio disponível, entre outros. E apesar da aplicação deste resíduo ser restrita, por exemplo, é proibido o uso de LE de classe B para o cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, há possibilidade de se propor novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais, os quais comprovem a segurança do uso do LE classe B. Portanto, este dispositivo legal que dispõe sobre o uso agrícola de LE possui como característica a proposta do diálogo entre a legislação e a pesquisa científica.

Em contrapartida, agências brasileiras de controle ambiental estão restringindo o uso agrícola do lodo, apenas devido a possível presença de patógenos e compostos orgânicos e inorgânicos potencialmente tóxicos neste resíduo, considerando que há potencial de contaminação ambiental (ABREU JUNIOR et al., 2008). Esta tendência vem ocorrendo no mundo, uma vez que um número crescente de governos locais e nacionais adotaram normas mais rigorosas para a gestão do LE (WANG, 2008).

A preocupação com danos ambientais e à saúde dos seres vivos é importante e necessária, entretanto, esta dinâmica de restrições gera um ambiente de instabilidade aos envolvidos no gerenciamento do LE, desestimulando essa alternativa de destinação. Desse modo, os órgãos responsáveis pela autorização do uso do lodo em área agrícola, devem estar atentos e agir com cautela, pois a aplicação de LE na agricultura deve ser a opção de gestão preferida onde há terras disponíveis, quando a qualidade do resíduo atende às exigências regulamentares e onde é aceitável socialmente (WANG, 2008).

A sociedade deve ser informada sobre a gestão do LE, desde a sua origem até a destinação final. O acesso da sociedade a informação deve melhorar a gestão sustentável dos resíduos, pois amplia o conhecimento, facilita o aprendizado dos responsáveis pela gestão do LE e dos produtores agrícolas, reconhecendo valor social, cultural e político nas decisões técnicas e envolve o público na tomada de decisão sobre a gestão e destinação dos resíduos locais (GOVEN; LANGER, 2009; McDEVITT; LANGER; LECKIE, 2013).

No cenário recente, pesquisas em gestão de LE analisam a questão dos contaminantes orgânicos, como, os hormônios e os antibióticos (XUAN; BLASSENGALE; WANG, 2008; SUBEDI et al., 2014; PYCKE et al., 2014), que podem prejudicar à saúde dos seres vivos, não sendo recomendável o uso de resíduo com tais contaminantes em áreas agrícolas e,

como alternativa de disposição final, é proposta a produção de energia a partir deste LE (EGAN, 2013).

Por outro lado, pesquisas estudam o LE de forma holística, analisando os aspectos da dinâmica do N, P, dos elementos inorgânicos potencialmente tóxicos e a viabilidade econômica (WANG; KIMBERLEY; SCHLEGELMILCH, 2003; SU et al., 2007; SU et al., 2008; KIMBERLEY et al., 2004); qualidade de produção do volume de madeira (SETTE JUNIOR et al., 2009; SETTE JUNIOR et al., 2012; WANG; KIMBERLEY; WILKS, 2013) e a introdução deste resíduo orgânico em cultivos de alimentos de consumo direto (FERRAZ, 2013; HAYASHI, ABDOULAYE, WAKATSUKI, 2010; PROSSER, 2014).

Constatou-se que a maioria dos estudos é favorável a aplicação de lodo em ambiente agrícola, mesmo porque os estudos que relatam a detecção de contaminantes orgânicos verificam a sua presença sem analisar o impacto das concentrações encontradas na saúde dos seres vivos e este tipo de compostos é encontrado em determinados lodos. Nesse sentido, também é válido o questionamento da capacidade dos tratamentos de esgotos e da necessidade de compostos orgânicos existentes em produto de higiene pessoal. Foi observado um certo apelo na pesquisa, contra a aplicação de LE em área agrícola, para a promoção do lodo no contexto de incentivo de fontes de energia alternativas.

A disposição final mais promissora do LE, devidamente condicionado, é a aplicação em áreas agrícolas, desde que, haja demanda de áreas agrícolas e que seja tomada às devidas medidas de prevenção e precaução em relação a contaminações e danos à saúde dos seres vivos. Portanto, a possibilidade de uso agrícola do LE no Brasil é uma alternativa considerável no âmbito agronômico e ambiental e está em consonância com os dispositivos legais vigentes no país.

2.3. Lodo de esgoto em plantio florestal

O setor de florestas plantadas é importante no âmbito econômico, social e ambiental, porque contribui para geração de produtos (papel e celulose, painéis e pisos de madeira, carvão vegetal, móveis entre outros), arrecadação de tributos, postos de trabalho, ocupa áreas degradadas e reduz o desmatamento de florestas nativas (MORA; GARCIA, 2000). Além disso, a produção de madeira ajuda a mitigar a emissão de gases causadores do efeito estufa pela fixação de CO_2 (MIEHLE et al., 2006; RAMLAL et al., 2009) e também pode ser utilizado para gerar biocombustível (GONZALES et al., 2011; ZHU; PAN, 2010).

Este setor possui aproximadamente 7,1 milhões de hectares de florestas plantadas no Brasil, principalmente, com espécies do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*, representando cerca de 0,8% do território nacional. Dessa área de florestas plantadas 76,6% são representadas por eucalipto, sendo situada, principalmente, nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná e Bahia (ABRAF, 2013).

O estado de São Paulo possuía cerca de 860 mil hectares de floresta plantada com eucalipto em 2008, sendo a concentração destas áreas na região centro-sul do estado conforme Figura 3 (SÃO PAULO, 2008). São Paulo passou a ter 1 milhão de hectare de floresta plantada com eucalipto em 2012, esse crescimento, observado em outros estados também, ocorreu devido ao estabelecimento de novos plantios com objetivo de atender as futuras demandas dos projetos industriais do segmento de papel e celulose (ABRAF, 2013).

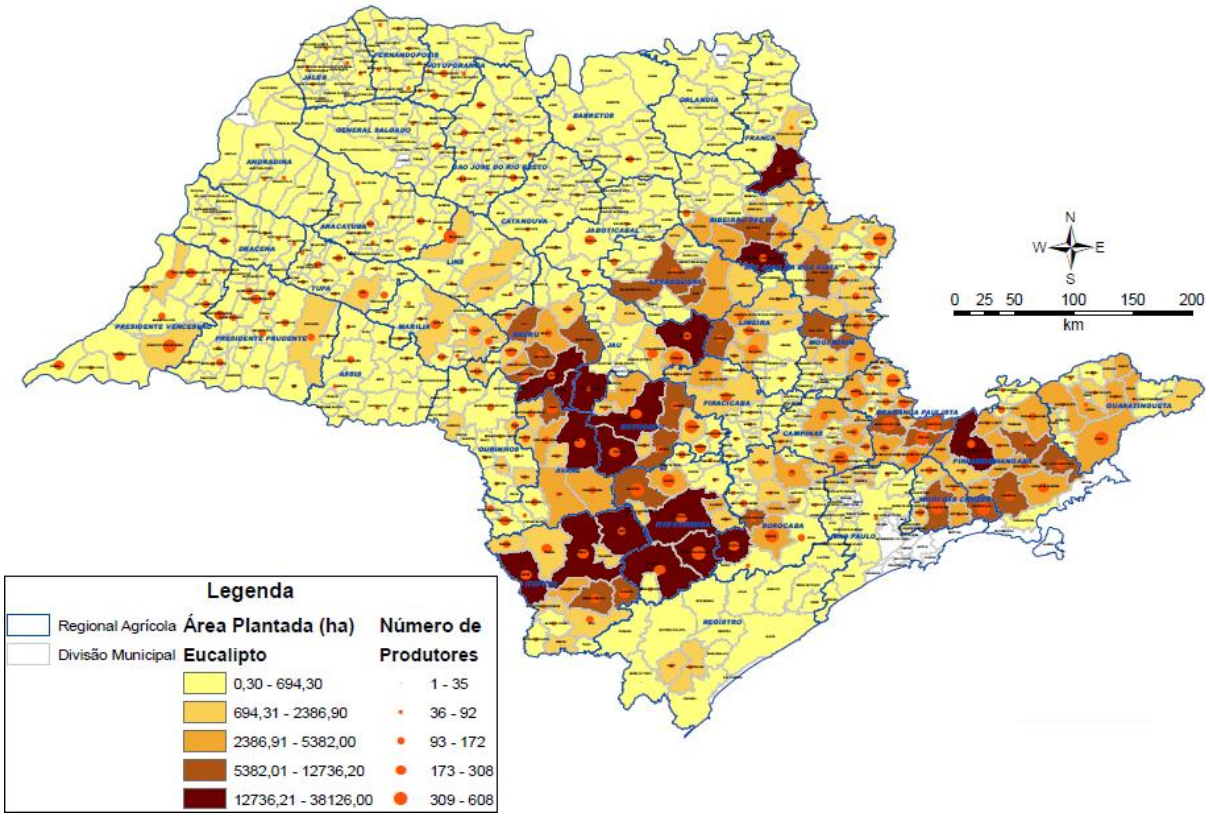

Figura 3 - Distribuição geográfica de áreas cultivadas com eucalipto no estado de São Paulo, 2007/2008 (SÃO PAULO, 2008)

Neste contexto, pode-se afirmar que há demanda de áreas de plantio de eucalipto no estado de São Paulo para aplicação de LE. Faria e Rodrigues (2000) concluíram que a aplicação de 10 Mg ha^{-1} de LE em áreas de plantio de eucaliptos e pinus apresenta grande

potencial agrícola. Estas florestas plantadas situavam-se a 80 km da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Barueri, SP, onde o LE é gerado. Considerando uma produção de 300 Mg dia^{-1} de LE pela ETE de Barueri e a dose de aplicação de 10 Mg ha^{-1} de LE em áreas de plantio de *Eucalyptus* e *Pinus*, o estado de São Paulo teria área de florestas plantadas suficiente para receber a quantidade produzida de LE em 180 dias pela ETE de Barueri.

O uso de LE em plantios eucalipto também é atraente devido ao produto final, a madeira, não ser destinada a alimentação humana e dos animais, o que reduz a dispersão de eventuais contaminantes na cadeia alimentar. Porém cuidados prévios devem ser realizados em relação à localização da área próxima aos mananciais e com a dosagem de aplicação do LE (POGGIANI; GUEDES; BENEDETTI, 2000). Os pontos anteriores somam-se ao fato que culturas florestais são mais eficientes no aproveitamento dos nutrientes que as de ciclo curto, pois possuem alta capacidade de produção de biomassa e sistema radicular profundo é bem distribuído no solo (GONÇALVES et al., 2000).

Como o solo de regiões tropicais possui uma composição mineralógica de baixa qualidade em relação à necessidade nutricional da planta e pelo fato das plantações florestais no estado de São Paulo e no Brasil se situarem em solos de baixa fertilidade, os quais necessitam de aporte significativo de fertilizantes contendo macro e micronutrientes (POGGIANI; GUEDES; BENEDETTI, 2000), o uso do LE em plantações florestais pode aumentar a fertilidade do solo, pois no processo de reciclagem do LE ocorre a mineralização da MO proveniente do lodo pelos microrganismos do solo e a liberação contínua dos nutrientes para a solução do solo, os quais poderão ser absorvidos pelo sistema radicular das plantas ou ficar adsorvidos nas cargas dos argilominerais e MO do solo.

De maneira geral, as pesquisas na Europa, América do Norte e Austrália mostram que o efeito do potencial agrícola do LE em áreas florestais é positivo (POGGIANI; GUEDES; BENEDETTI, 2000; WANG, 2008). Na década de 90, o lodo gerado na cidade de Nelson, Nova Zelândia, foi aplicado em solo arenoso nas doses de 300 e 600 kg de N ha^{-1} com plantio de pinus aos 6, 9 e 12 anos. Após 6 anos da primeira aplicação do LE, houve aumento do diâmetro, da área basal, do volume de madeira e da altura do tronco em função da dose de LE. O efeito positivo do LE sobre o plantio de *Pinus radiata* deve-se, principalmente, a absorção do nitrogênio inorgânico (liberado no processo de degradação microbiana do nitrogênio orgânico presente no resíduo) pelo sistema radicular das plantas, pois a testemunha (sem LE e sem adubo mineral) apresentou árvores *Pinus* com concentração de nitrogênio nas folhas abaixo do nível adequado para a nutrição da planta (WANG et al., 2006; KIMBERLEY et al., 2004).

Kimberley et al. (2004), também verificaram que a qualidade da água subterrânea não foi alterada pela aplicação de LE. As concentrações das substâncias inorgânicas potencialmente tóxicas estiveram abaixo do valor máximo aceito para qualidade de consumo de água. Nas amostras de solo, observou-se que as concentrações destas substâncias também foram muito baixa (SU et al., 2008).

Ao aplicar LE, dose de 34 Mg ha^{-1} em base seca, em uma área degradada nos EUA, obteve-se um aumento de 92 e 300% na produção de biomassa total de *Pinus echinata* e *Pinus taeda*, respectivamente, quando comparado a fertilização mineral aos 5 anos de idade das espécies citadas (MCNAB; BERRY, 1985).

Os primeiros estudos no Brasil sobre a aplicação de LE em áreas florestais foram feitos pela parceria entre SABESP/IPEF/ESALQ, que realizaram, na Estação Experimental de Itatinga-SP, a instalação de experimento com *Eucalyptus grandis* tratados com LE em solo com textura médio-arenosa. A aplicação do LE foi pós-plantio, entre as linhas de plantio e os tratamentos foram: testemunha, 5 Mg ha^{-1} de LE com suplementação de K; 10 Mg ha^{-1} de LE com suplementação de K; 10 Mg ha^{-1} de LE; 10 Mg ha^{-1} de LE com suplementação de K e P; 15 Mg ha^{-1} de LE com suplementação de K; 20 Mg ha^{-1} de LE com suplementação de K; e 40 Mg ha^{-1} de LE com suplementação de K. O objetivo foi avaliar o efeito do LE sobre a nutrição mineral, a produção do volume de madeira, a qualidade da madeira, as substâncias inorgânicas potencialmente tóxicas na planta e no solo e a fertilidade do solo (POGGIANI; GUEDES; BENEDETTI, 2000).

Rocha, Gonçalves e Moura (2004) observaram aos 32 meses após a aplicação do LE que a fertilidade do solo aumentou, pois o resíduo promoveu aumentos nos teores de matéria orgânica nas camadas de 5-10 e 10-20 cm de profundidade do solo. Após cinco anos a aplicação do LE, a qualidade da matéria orgânica na camada de 0-5 cm de profundidade do solo foi alterada nos tratamentos que receberam 40 Mg ha^{-1} de LE e a adubação mineral (ANDRADE; OLIVEIRA; CERRI, 2005). Este resultado pode ser explicado pelo aumento de lignina no total da matéria orgânica do solo. Em ambos os tratamentos o aumento da lignina na matéria orgânica deve-se ao crescimento da parte aérea da árvore e deposição de folhas sobre o solo.

A aplicação de doses de 5, 10, 20 e 30 Mg ha^{-1} de LE seco (granulado) e LE úmido (torta) com complementação de K e B em cultura de eucalipto, apresentaram efeito positivo sobre o crescimento das árvores de eucalipto aos 18 meses após o plantio (SILVA et al., 2008a). Em relação ao LE úmido, a vantagem do LE seco é a logística de

distribuição em campo, pois a aplicação do resíduo na forma granulado é mais eficiente do que na forma de torta.

Silva et al. (2008b) observaram que a aplicação de LE com complementação com K e B alterou positivamente os teores de P, K, Ca, B e Zn nas folhas, e negativamente o teor de Mn. Guedes et al. (2006) estudaram o efeito do LE alcalino sobre plantas jovens de eucalipto cultivada em viveiro com colunas de PVC e observaram que os teores foliares de Ca, N, P e S aumentaram e os teores de Mn e Mg diminuíram com a aplicação do LE alcalino; além disso, este lodo diminuiu a acidez do solo, o que explica o aumento da disponibilidade dos nutrientes no solo e a absorção destes pelo sistema radicular das plantas.

Após 5 anos da aplicação de LE em *Eucalyptus grandis*, observou-se que os indivíduos arbóreos que receberam 10 Mg ha^{-1} de LE, com complementação de K e P, apresentaram desenvolvimento semelhante ao tratamento com adubação mineral, produzindo, em média, 107,5 Mg ha^{-1} de biomassa acima do solo, 63% a mais que o controle (sem adubo). A pesquisa concluiu que a aplicação deste resíduo contribui para o desenvolvimento das árvores, pelo fato de propiciado entradas de material orgânico no sistema (LIRA; GUEDES; SCHALCH; 2008).

Em relação às características biológicas, um estudo mostrou efeito positivo das doses de 20, 40 e 60 Mg ha^{-1} de LE, base seca, sobre os microrganismos do solo. Os autores observaram aumentos na respiração basal, no coeficiente metabólico e na atividade dos microrganismos, mas não houve aumento da biomassa microbiana do solo após 15, 30, 60 e 90 dias a aplicação do LE, assim concluíram que a adição de LE favoreceu o desenvolvimento dos microrganismos mais ativos do solo e de pequeno índice de crescimento (CARDOSO; NETO, 2000).

O estudo da dinâmica do nitrogênio em solos com cultivo de eucalipto e tratado com doses de 10 a 40 Mg ha^{-1} de LE, mostrou que não houve efeito das doses de LE sobre o teor total de N e o teor de N inorgânico nas camadas de 0-0,30; 0,30-0,60 e 0,60-0,90 m de profundidade do solo após seis meses da aplicação do resíduo (MATTIAZZO; ANDRADE, 2000). Este resultado indica que o nitrogênio inorgânico pode ter sido absorvido pelo sistema radicular das árvores de eucaliptos e, ou, por não ter ocorrido a degradação microbiana do nitrogênio orgânico após seis meses da aplicação do LE, uma vez que, não houve incorporação do resíduo ao solo, a aplicação de LE foi realizada na linha de plantio e na superfície do solo.

Firme (2009) estudou o efeito dos elementos potencialmente tóxicos presentes no LE sobre na cultura de eucalipto e no solo. Os teores de Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Cr, Ni e Pb no

lenho, casca, folhas, galhos e serapilheira, coletados 43 meses após o plantio, estiveram dentro dos níveis aceitáveis para a nutrição da planta e os teores destes elementos no solo estiveram abaixo do valor orientador de prevenção estabelecido pela CETESB (2005) com a aplicação da dose de 15,4 Mg ha^{-1} de LE recomendada pelo critério de N. Portanto, concluiu-se que os elementos potencialmente tóxicos (Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Cr, Ni e Pb) presentes na composição do LE não causaram contaminação no ambiente florestal.

O uso do LE na agricultura também pode promover o efeito residual para as culturas (HENRY; COLE, 1997). Em Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e Latossolo Vermelho Escuro (LVE) com cultivo de eucalipto e após 14 anos da aplicação de LE, observou efeito residual do LE na fertilidade destes solos (FERRAZ, 2013).

Nesse contexto, o uso do LE em plantios de eucalipto é promissor, pois apresenta potenciais efeitos benéficos sobre as características químicas, físicas e biológicas do solo, baixo potencial de disseminação de contaminantes na cadeia alimentar e existência de áreas de plantio de eucalipto para aplicação do LE, como é o caso do Estado de São Paulo.

2.4. Produção de madeira em plantio de eucalipto com aplicação de lodo de esgoto

Diante das limitações climática, genética, edáfica e financeira do cultivo de espécies florestadas e reflorestadas, medidas técnicas integradas de manejo florestal devem ser adotadas com o objetivo de conservar e melhorar a fertilidades dos solos. Nesse sentido, a fertilização do solo é fator estratégico que pode manter ou elevar a produtividade florestal (GONÇALVES et al., 2000; STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004).

Em regiões de clima temperado e tropical foram obtidos incrementos de 15 a 25 m^3 ha^{-1} ano^{-1} de volume de madeira (MORA; GARCIA, 2000). Portanto, segundo os autores, a escolha cuidadosa do local de plantio, a seleção dos melhores materiais genéticos, a realização adequada da adubação e dos tratos culturais permitem obter, em escala comercial, plantações de eucalipto com volume de madeira de 50 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. No Brasil, o incremento médio anual de volume de madeira em plantações de eucalipto é de 40,7 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (ABRAF, 2013).

A produtividade do plantio de eucalipto depende de clima, solo e intensidade de manejo. Para a maioria dos solos brasileiros, a adubação com fósforo é fundamental, sendo que a espécie *E. grandis* responde à adubação com nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) e, em alguns casos, é necessária a adubação com boro e zinco (MORA; GARCIA, 2000).

A recomendação de nitrogênio a ser aplicada no florestamento de eucalipto é baseada no teor de matéria orgânica no solo, pois a presença de matéria orgânica no solo é o que determina o estoque de nitrogênio. A recomendação de fósforo se baseia no teor de argila do solo, ou seja, quanto maior o teor de argila maior será a dose de aplicação deste nutriente no solo, pois solos argilosos e ácidos apresentam elevado teor de ferro e alumínio onde parte do fósforo disponível na solução do solo fixa-se formando os compostos de ferro e alumínio e tornando-o indisponível para as plantas (GONÇALVES; VAN RAIJ; GONÇALVES, 1997).

Em solos de clima tropical e subtropical, a primeira rotação da plantação de eucalipto não respondeu positivamente a adubação nitrogenada, provavelmente o N inorgânico disponível na solução do solo pela mineralização do N orgânico do solo foi suficiente para atender a demanda deste nutriente pela planta (GONÇALVES et al., 2004). No estágio de crescimento inicial dos povoamentos de *Eucalyptus*, a fertilização nitrogenada pode disponibilizar N em uma fase que as taxas de mineralização de N orgânico no solo não são suficientes para atender o nível adequado de N para as árvores. No estágio final de crescimento do eucalipto, ocorre competição entre as árvores por nutrientes, água e luz, levando a um decréscimo gradual das respostas positivas à adubação nitrogenada e as quantidades de N mineralizadas tornam-se suficientes para atender a demanda da árvore, (PULITO, 2009).

Em relação ao fósforo, apesar do eucalipto, normalmente, ser eficiente na captação e utilização deste elemento, sua baixa disponibilidade em solos altamente intemperizados tem o potencial de limitar o crescimento em regiões tropicais e subtropicais (LUCAS et al., 2002; GONÇALVES et al., 2004; SILVEIRA; GAVA, 2000). Baixas taxas de aplicação de fertilizante fosfatado impactam positivamente no P disponível no solo, perdurando, provavelmente, por toda rotação em plantio florestal (TURNER; LAMBERT; HUMPHREYS, 2002).

Até o fechamento da copa dos indivíduos arbóreos em um sistema florestal (aproximadamente 24 meses após o plantio), a demanda por N é alta, devido à síntese intensa de folhas e galhos e do sistema radicular. A aplicação do LE em plantio de eucalipto possibilita o aumento do teor de N nas folhas em função das doses de LE, pois a absorção de N inorgânico proveniente da mineralização do N orgânico presente na matéria orgânica do LE e do solo. Em relação ao nutriente P, não houve alteração no teor de P nas folhas de eucalipto após 12 meses do plantio, ou seja, após 8 meses da aplicação do LE, o que não ocorreu no tratamento com adubação mineral, uma vez que, a disponibilidade de P é imediata para a absorção deste nutriente pelo sistema radicular das árvores. Após 24 meses do plantio de

eucalipto, também observaram que o teor de P na folha nos tratamentos com LE foi superior ao tratamento testemunha, indicando que a disponibilidade de P para o sistema radicular das árvores de eucaliptos tratadas com LE perdura ao longo do tempo (VAZ, GONÇALVES, 2002; ROCHA; GONÇALVES; MOURA, 2004).

As respostas da aplicação de LE em plantio de eucalipto são semelhantes às obtidas pela fertilização mineral (PRESCOTT; BROWN, 1998; WEETMAN et al., 1993), sendo os seus resultados, geralmente, atribuídos ao nitrogênio ou fósforo contidos neste resíduo. O efeito positivo do lodo é, normalmente, maior em solos mais pobres e, especialmente, em sítios com deficiência de nitrogênio (HENRY; COLE, 1997).

Silva et al. (2008a), em experimento com doses de lodo de 10, 20 e 30 Mg ha^{-1} aplicados na linha de plantio de *Eucalyptus grandis*, observaram que os tratamentos com aplicação de lodo obtiveram volume de madeira superiores ao controle, sem adubo, e semelhante ao do tratamento com adubação mineral aos 18 meses pós-plantio. Nesta pesquisa, os autores concluíram que a aplicação do lodo deve ser nas linhas de plantio, pois o volume de madeira obtido foi superior a 30 m^3 ha^{-1}, sendo que Guedes e Poggiani (2003) obtiveram, nos tratamentos com doses crescentes de lodo aplicado nas entrelinhas de plantio, um volume de madeira variando entre 15 e 20 m^3 ha^{-1}. Este fato ocorre, provavelmente, porque as raízes finas dos eucaliptos apresentam maior habilidade de absorção de água e nutriente e estas se concentram nos primeiros trinta centímetros do solo, principalmente, em solos menos produtivos (GONÇALVES, 1994).

Guedes (2000) constatou o efeito positivo da aplicação do lodo sobre o crescimento dos eucaliptos, mas apenas 10 meses após sua aplicação nas entrelinhas de plantio, a partir desse fato, o autor sugeriu que deveria se manter a adubação mineral de base, o que estimularia o crescimento inicial das árvores tratadas com lodo aplicado nas entrelinhas. Ainda de acordo com Silva et al. (2008b), foi notado que as parcelas experimentais dos eucaliptos, tratados com LE, apresentaram o fechamento mais rápido das copas em relação ao controle e com adubo mineral.

No que tange a produção de volume de madeira, ao estudar a aplicação do lodo, em doses de 5, 10, 15, 20 e 40 Mg ha^{-1} e suas complementações, como descrito na página 28, em *Eucalyptus grandis* aos 17 e 24 meses de idade, obteve-se o maior volume de madeira com casca no tratamento de 10 t ha^{-1} do LE com suplementação de K e P, que teve resultado superior em 10 e 30% em relação a fertilização mineral, respectivamente. Este acréscimo de produtividade é atribuído a outras propriedades do lodo, e não aos efeitos dos nutrientes K e P, assim, é provável que a disponibilização de N a partir do resíduo e a maior absorção deste

nutriente sejam as causas principais desse rendimento (VAZ; GONÇALVES, 2002; GUEDES; POGGIANI, 2003).

Aos 24 e 36 meses de idade do *Eucalyptus grandis*, para o mesmo experimento citado acima, observou-se queda do incremento médio na produção de madeira para os eucaliptos tratados com lodo, ainda assim, a produção de madeira com a aplicação de lodo permaneceu mais alta quando comparada à adubação mineral. A produção de madeira obtida na adubação mineral poderia ser alcançada pelo tratamento de 12 t ha^{-1} de lodo, sendo o cálculo estimado por regressão (ROCHA; GONÇALVES; MOURA, 2004).

No estudo das interações de doses de LE x N x P sobre o volume de madeira de eucalipto, obteve-se valor máximo de 168 m^3 ha^{-1} de volume de madeira com aplicação da dose recomendada pelo critério de N de 15,4 Mg ha^{-1} de LE, complementado com 55,9 kg ha^{-1} de P_2O_5 e sem adubação nitrogenada, aos 43 meses após o plantio (FIRME, 2009). Este resultado foi 18% maior do que o tratamento com adubação mineral e promoveu redução de 33% e 100% a dose recomendada de adubo fosfatado e nitrogenado para plantio de eucalipto, respectivamente. Além disso, este estudo mostrou que a melhor condição de manejo do LE pode ser obtido com a aplicação de 7,7 Mg ha^{-1} de LE e de 28 kg ha^{-1} de P_2O_5, sem adição de N, pois ainda proporciona um volume de madeira 8% maior do que o tratamento com adubação mineral recomendada e reduz em 66% a dose da adubação fosfatada e 100% a dose da adubação nitrogenada.

Cinco anos após o plantio de eucalipto na área experimental de Itatinga, constatou-se que o efeito dos tratamentos sobre a produção volumétrica dos eucaliptos possuía a seguinte ordem de importância para a produção comercial de madeira: 10 Mg ha^{-1} de lodo com suplementação de K e P = adubação mineral > 40 Mg ha^{-1} com suplementação de K = 20 Mg ha^{-1} com suplementação de K. Do terceiro para o quinto ano houve maior desenvolvimento dos eucaliptos que receberam adubação mineral e a diferença em relação ao tratamento

10 Mg ha^{-1} de lodo com suplementação de K e P deixou de ser significativa. Neste estágio de desenvolvimento, a diferença entre os tratamentos deixou de ser significativa devido à maior competição por água e luz dentro do ecossistema, limitando a absorção de nutrientes pelas raízes das árvores (GUEDES, 2005).

Para o mesmo experimento mencionado acima, o tronco respondeu pela maior parte do aumento do estoque da vegetação, sendo que o compartimento de lenho representou, aproximadamente, 75% da biomassa aérea dos eucaliptos em todos os tratamentos. O tratamento de 10 Mg ha^{-1} de LE + KP apresentou a maior biomassa total de tronco acumulada

em cinco anos e foi de 94,9 Mg ha^{-1}, o que resultou em um incremento médio anual de 19 Mg ha^{-1} ano^{-1} de madeira com casca (LIRA; GUEDES; SCHALCH, 2008). Ao avaliar a diferença entre duas espécies de eucalipto com 6,5 anos em cinco sítios no interior do estado de São Paulo, encontraram valores variando de 95 a 206 Mg ha^{-1} de matéria seca de tronco (SANTANA; BARROS; NEVES, 1999).

Em relação à produção de volume de madeira de eucalipto com casca aos 99 meses após o plantio na área experimental de Itatinga, notou-se que o melhor resultado foi obtido também com a dose de 10 Mg ha^{-1} LE com complementação de K e P, 371,4 m^3 ha^{-1}, com níveis de produção semelhante a fertilização mineral convencional, 362,2 m^3 ha^{-1}, e proporcionando um aumento de 53% em relação ao controle, 242,6 m^3 ha^{-1} (FARIA, 2007).

Portanto, os resultados apresentados acima evidenciam que a aplicação de lodo em eucalipto pode resultar em produção de volume de madeira equivalente, ou superior, ao manejo com uso de adubo mineral, sendo necessária a complementação com fertilizante mineral na adubação de base. Assim, a utilização de LE não acarreta em prejuízos ao produtor florestal em relação à questão de produtividade de madeira. Contudo, ainda não é evidente a quantidade de N, de P e de outros nutrientes que deverá ser aplicado para incrementar, ou pelo menos manter, os níveis adequados de fertilidade do solo e de produção de madeira em plantio de eucalipto tratado com LE.

2.5. Viabilidade econômica da aplicação de lodo de esgoto em sistema agrícola

Uma importante etapa de avaliação de viabilidade do uso agrícola de um resíduo refere-se ao aspecto econômico, pois certos fatores podem ser determinantes na avaliação da viabilidade econômica como a não existência de demanda na região pelo resíduo, ou mesmo as restrições em relação ao uso do resíduo pelos agricultores, ou ainda, a não proximidade entre a região que demanda o produto e a fonte geradora. Desta forma, deve-se avaliar se é viável transportar o resíduo, uma vez que, geralmente, o custo do transporte é a principal limitação econômica (PIRES; MATTIAZZO, 2008).

Em relação ao LE, há várias formas para determinar o seu valor para o uso agronômico, dentre elas: a) baseado no seu conteúdo de nutriente e matéria orgânica; b) pelo valor de produtos semelhantes, como esterco animal e composto orgânico; c) pelo acréscimo de produção que ele pode proporcionar às diferentes culturas (FARIA, 2007).

A partir da determinação da composição de macronutrientes contidos no lodo, avaliou-se a viabilidade do uso agrícola deste resíduo, sendo considerado o custo de transporte e estipulado o valor do lodo, tendo como base a economia gerada pelo adubo mineral, pelo método de mercados de bens substitutos, desse modo, utilizou-se o preço de mercado de superfosfato simples, sulfato de amônia e cloreto de potássio. Concluiu-se que o transporte do LE é vantajoso, pois o seu custo é de R$ 11,84 por megagrama, quase dez vezes inferior ao preço do fertilizante mineral (QUINTANA; BUENO; MELO, 2012).

Analisou-se o valor do LE a partir do seu conteúdo de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica com base no custo de mercado da ureia, superfosfato triplo, esterco e composto. Obteve-se o seguinte resultado: 22,00 R$ ha^{-1} de lodo fresco; 31,20 R$ ha^{-1} de composto de LE; 41,20 R$ ha^{-1} de LE com cal; 29, 80 R$ ha^{-1} de LE seco ao ar; 158,60 R$ ha^{-1} de LE seco termicamente (CORRÊA; CORRÊA, 2001).

Porém, esse método da valoração de bens substitutos, que se baseia no conteúdo de nutriente do LE, não considera a quantidade de nutriente proveniente do LE disponível para o solo, assim os valores de macro e micronutrientes que serão liberados não são determinados, ao contrário, do que ocorre com o mercado de fertilizante mineral, no qual é informado o quanto do nutriente do produto será disponibilizado para o solo. Este fato traz alguns questionamentos para o método que utiliza simplesmente as quantidades de nutrientes contidos no lodo.

Para uma correta avaliação financeira de fertilização, são imprescindíveis informações para avaliar as doses de fertilizantes aplicados e as suas respostas em volume de planta (FERREIRA[1], 1983 apud FARIA; RODRIGUEZ, 2000). Assim, o levantamento do melhor manejo em relação à nutrição mineral de qualquer cultura deve considerar o efeito do nutriente, seja pelo adubo mineral e/ou aplicação de LE sobre a produção vegetal, bem como outros aspectos que interfiram no custo do plantio e na receita obtida pela produção.

Na avaliação da viabilidade agronômica de um LE industrial, apesar de não ser permitido sua aplicação em área agrícola (CONAMA, 2006), para a cultura de milho com doses de LE de 0, 6, 12, 18 e 24 Mg ha^{-1}, conclui-se que a produtividade obtida pela adubação mineral foi semelhante ao verificado pelo uso de 10 Mg ha^{-1} de LE, desta maneira, estimou-se o valor de LE em 43,70 R$ Mg^{-1} base seca e 8,74 R$ Mg^{-1} base úmida com base na equivalência ao NPK. Considerando o custo de transporte de 1,60 R$ km^{-1}, a aplicação deste

[1] FERREIRA, J. M. Análise econômica preliminar da adubação mineral de eucalipto. In: Simpósio sobre Energia da Biomassa Florestal. São Paulo: CESP, 1983. p. 241-253.

resíduo é economicamente viável numa distância de até 66 km da fonte geradora (TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2005).

Um levantamento da relação custo-benefício foi realizado para a cultura de milho que utilizou fertilizante mineral e doses de LE de 0; 7,5; 15; 30 e 45 Mg ha^{-1} em base úmida. Esta relação foi estabelecida por meio da produtividade de grãos e do custo com a produção, no qual foi considerado transporte (22,00 R$ ha^{-1}), distribuição (24,00 R$ ha^{-1}) e incorporação (20,00 R$ ha^{-1}) do LE. Concluiu-se que o LE foi, em média, 21% mais eficiente que o fertilizante mineral em produtividade e a melhor relação custo-benefício foi obtida com a aplicação de 30 Mg ha^{-1} de LE úmido (SILVA; LEMAINSKI, 2006a).

Analisou-se a viabilidade econômica da aplicação de LE na cultura de soja para as doses de 0; 7,5; 15; 30 e 45 Mg ha^{-1} em base úmida por meio da metodologia de relação custo-benefício. Neste estudo, utilizou-se para o cálculo da receita a produção de grãos e para o do custo foram consideradas as variáveis de transporte, de distribuição e de incorporação semelhante ao mencionado no trabalho acima. Foi determinado o valor do lodo úmido, com base no mercado de bens substitutos, de 30,44 R$ ha^{-1} pelo método de custo de reposição de N, P e K, definido a partir do preço do fertilizante mineral. Os pesquisadores concluíram que o LE foi, em média, 18% mais eficiente que o fertilizante mineral e a melhor relação benefício-custo foi obtida com a aplicação de 30 Mg ha^{-1} de LE (SILVA; LEMAINSKI, 2006b).

Para avaliar a viabilidade econômica da aplicação de lodo em milho, utilizou-se a metodologia do Instituto de Economia Agrícola (IEA, 2014). Assim, determinou-se a rentabilidade efetiva e total e os custos operacionais efetivos e totais para os tratamentos com doses de 0, 5, 10 e 20 Mg ha^{-1} de LE base seca. A aquisição deste resíduo foi considerada sem custo neste experimento, pois o lodo foi doado e o custo de transporte é, segundo os autores, de responsabilidade da ETE. Concluiu-se que a adubação com LE proporcionou maior rentabilidade quando comparada à fertilização mineral e a dose economicamente adequada foi de 13,50 Mg ha^{-1} de lodo (QUINTA; CARMO; MELO, 2009).

Ao analisar a viabilidade econômica do uso de lodo em plantio de alface, determinou-se o retorno líquido da aplicação de LE para diferentes doses em Sahel (África) importado do Japão. Para esta determinação, utilizou-se as variáveis de receita pela multiplicação de rendimento por preço unitário e custo total pelo somatório do custo com sementes, mão-de-obra, fertilizante mineral e esterco de vaca, sendo o custo do lodo estipulado pelo valor do transporte de navio. Este estudo demonstrou que, apesar do alto custo com a importação, a utilização do lodo no plantio de alface é rentável como evidenciado pelo retorno líquido

positivo, podendo contribuir com a agricultura local de subsistência (HAYASHI; ABDOULAYE; WAKATSUKI, 2010).

Desse modo, observa-se a utilização de diferentes métodos no estudo da viabilidade econômica para o uso agrícola do lodo, além disso, as variáveis utilizadas para a determinação do custo mudam de acordo com cada realidade experimental, posto que, enquanto um estudo considera não haver custo para a aplicação do LE, outro determina o valor do transporte, da distribuição no solo e do resíduo. Estas diferenças dificultam a comparação dos resultados entre as pesquisas, porém, todas as respostas foram favoráveis ao uso agrícola do LE pelo âmbito econômico.

2.6. Viabilidade econômica da aplicação de lodo de esgoto em sistema florestal

No contexto florestal, a tendência positiva é verificada para *Pinus radiata*, pois, sob a aplicação do LE, com doses de 300 e 600 kg N ha^{-1} e controle, aos 6 anos de idade em solo arenoso, obteve-se um acréscimo no valor presente líquido (VPL) de 217 e 411 dólares neozelandês nos tratamentos com baixa e alta dose de LE, respectivamente, quando comparado ao controle. Para este estudo estipulou-se uma taxa de juros de 7% a.a. e não foi considerado o custo de aplicação deste resíduo (KIMBERLEY et al., 2004).

Para o mesmo experimento, foi observado algumas influências negativas sobre as propriedades da madeira, como redução da sua rigidez e densidade. Contudo, notou-se o aumento do seu diâmetro e volume, o que supera os efeitos negativos, uma vez que, em relação ao controle, a dose alta e baixa de lodo deverá aumentar o valor da madeira em pé em 24 e 14%, respectivamente, aos 18 anos de idade (WANG; KIMBERLEY; WILKS, 2013).

No setor florestal brasileiro, estudos de custos são recentes. Desta maneira, pesquisa de viabilidade econômica da aplicação de LE em plantio florestal é uma temática nova. Além disso, o empreendimento florestal possui algumas características peculiaridades que interferem diretamente na avaliação de viabilidade econômica, dentre elas: a) o caráter multianual dessa atividade; b) a idade ótima de rotação ou do desbaste não é necessariamente pré-determinado como na agricultura, pois a possibilidade de usufruto ou de corte da madeira depende da oportunidade da época e da rentabilidade de floresta; c) as variáveis que compõe o custo podem se diferenciar dependendo se a empresa é uma reflorestadora independente ou se for uma empresa verticalizada como de papel e celulose, ou ainda se é uma grande empresa reflorestadora ou um pequeno produtor (GRAÇA; RODIGHERI; CONTO, 2000).

A decisão sobre a viabilidade de uma alternativa isolada ou comparada a outras exige o emprego de critérios e regras que devem ser obedecidos para que as alternativas possam ser aceitas e ordenadas por preferência (CONTADOR, 1988). Entre os métodos que usam fatores de desconto, ou seja, aqueles que consideram a dimensão do tempo do valor do dinheiro, o valor presente é mais preciso que os demais na maioria dos casos (NORONHA, 1981). A viabilidade econômica de um projeto analisado pelo método do VPL é indicada pela diferença positiva entre receitas e custos, atualizados de acordo com determinada taxa de desconto. Quanto maior o VPL, mais atrativo será o projeto. Quando o VPL for negativo, o projeto será economicamente inviável (REZENDE; OLIVEIRA, 2001). O VPLA tem a mesma interpretação do VPL, porém representa a expectativa de retorno distribuída em valores equivalentes anuais (SOUZA; CLEMENTE, 2004).

A taxa de juros é uma variável que faz parte do cálculo do VPLA e é um item crítico na avaliação de alternativas quando a dimensão temporal é relevante, como em empreendimento florestais, caracterizado pelo longo prazo e pela grandeza de investimentos (REZENDE; OLIVEIRA, 2001). Tradicionalmente para projetos florestais, estas taxas variam de 6 a 12% a.a. (LIMA JÚNIOR et al., 1997)

No experimento descrito anteriormente por Poggiani, Guedes e Bendedetti (2000), página 28, foi avaliada a viabilidade econômica do uso de LE em plantio de *Eucalyptus grandis* com 99 meses de idade. Para esta análise, Faria (2007) utilizou a metodologia do valor presente líquido anualizado (VPLA) com taxa de desconto de 12% a.a. e considerou para o cálculo de receita: produção de madeira e o preço para a venda da madeira de eucalipto em pé; e para o custo: elaboração do projeto técnico de aplicação de LE, monitoramento do lodo na ETE e do solo nas áreas de aplicação, distribuição mecanizada nas áreas florestais, transporte de lodo das ETEs até as áreas florestais, sendo estabelecido não haver valor comercial para o lodo.

Faria (2007) concluiu que a dose de 5 Mg ha^{-1} complementada com potássio é a mais recomendável e que dose de LE inferiores a 20 Mg ha^{-1} e em raios de transporte de até 365 Km são viáveis economicamente se complementadas com as doses de potássio e fósforo testadas. Entretanto, não houve taxa de aplicação de LE, complementado ou não, que resultasse em VPLA equivalente ao obtido pela fertilização convencional para eucaliptos (333,69 R$ ha^{-1} ano^{-1}). Assim, o pesquisador afirmou que produtores que já realizam a fertilização convencional dificilmente se sentiriam atraídos ao uso do LE, caso não sejam incentivados a isso. Porém, quando possível à redução dos custos de utilização aos produtores, os resultados econômicos seriam mais favoráveis ao uso do LE.

O custo de transporte entre a ETE (geradora do resíduo) e a área agrícola receptora é um fator limitante na aplicação agrícola do LE (RIEKERK, 2000; SILVA; RESCK; SHARMA, 2002). O custo da aplicação de LE em floresta de Washington (EUA) é de 20 US$ Mg^{-1}, sendo que 50% desse valor é referente ao transporte (HENRY; COLE, 1997). Na Suécia, o custo do uso do LE na agricultura é de US$ 74,80, sendo, normalmente, o transporte responsável por mais de 50% dos custos totais, e, nesse caso, é necessário o pagamento aos agricultores (LUNDIN et al., 2004). Nos EUA, há situação em que o produtor rural paga pelo LE, como no caso de Seattle e Washington, enquanto há situações que a ETE arca com todo, ou parte, do custo (USEPA, 1999).

A demanda pelo LE é um fator essencial na determinação do seu valor. Assim, somente os municípios com demanda igual ou maior que a capacidade de produção de LE são capazes de cobrar pelo resíduo, em outra situação, o município doa, sendo que em alguns casos, o frete é subsidiado como estratégia de indução de demanda (KVARNSTROM; NILSSON, 1999). Portanto, verifica-se que a questão do custo do transporte do LE pode ser ou não arcada pelo produtor, sendo que esta dinâmica depende da realidade de cada país a qual está associada à demanda pelo LE e à política pública de gestão de resíduo.

Para que haja viabilização econômica do uso do LE em culturas agrícolas, sugere-se que o custo de transporte deve ser arcado pelas empresas geradoras do resíduo, pois esta alternativa ainda seria mais vantajosa quando comparada a manter o lodo em lagoas de estabilização ou incinerá-lo (TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2005; SIGN; AGRAW, 2008). A Companhia Suzano Papel e Celulose utilizou operacionalmente o LE oriundo da ETE de Jundiaí, SP, em suas florestas de eucalipto do estado de São Paulo arcando com 20% do custo do transporte, e esta estratégia ainda é economicamente viável para a ETE quando consideradas outras opções de destino final para o LE, incluindo aterros sanitários particulares (GAVA; OLIVEIRA, 2006; FARIA, 2007).

Paralelamente, a Resolução CONAMA n° 375 (CONAMA, 2006) responsabiliza a unidade gerenciadora do lodo (UGL) pelo procedimento de carregamento e transporte do LE, portanto, o gerador é responsável pelo seu resíduo, pois a função da UGL será executada pela própria ETE ou ela poderá terceirizar esse serviço, de qualquer modo o ônus será do gerador. E a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) corrobora a ideia de responsabilidade do gerador do resíduo, desse modo, é nítido que, o gerador possui o dever de gerenciar o LE de maneira ambientalmente adequada, tal obrigação é evidenciada, principalmente, pelo princípio poluidor-pagador desta Política.

Desse modo, legalmente, interpreta-se que o lodo deve ser transportado pelo gerador, o que geraria redução de custo ao produtor florestal que usar o LE, podendo motivar respostas econômicas (VPLA) mais favoráveis para o seu uso em eucalipto em relação à fertilização mineral.

Portanto, as respostas de viabilidade econômica, geralmente, são positivas ao uso de LE no ambiente agrícola e florestal, apesar das diferentes metodologias e da utilização de diferentes variáveis que compõem o custo. Entretanto, o produtor florestal, que já aplica fertilizante mineral, não se sentiria motivado, pelo aspecto econômico, a aplicar LE em plantio de eucalipto, uma vez que o seu retorno líquido com a adubação mineral convencional é maior.

3. HIPÓTESES

A aplicação de LE e de adubação mineral fosfatada têm efeito sobre a produção de biomassa na plantação de *Eucalyptus grandis*. O melhor desenvolvimento do eucalipto está associado ao uso deste resíduo com base no critério de nitrogênio, ou seja, na dose em que o LE forneça 100% do N requerido pela cultura, que contribui para o incremento dos componentes da árvore, sendo o tronco beneficiado, pois corresponde a maior parte do aumento arbóreo;

O uso de LE e de fertilizante mineral fosfatado possui efeito sobre a produção de madeira em plantio de *Eucalyptus grandis*. O maior volume de madeira de eucalipto com casca é obtido à dose de 100% da recomendação da Resolução CONAMA n° 375 de 2006, que permite a aplicação do LE pelo critério com base em nitrogênio;

O potencial do LE em área de plantação de *Eucalyptus grandis* proporciona acréscimos no volume de madeira que reflete em VPLA positivos, ou seja, em tratamentos viáveis economicamente. Porém, é necessário que o custo de transporte do LE seja isento ao produtor florestal para que os tratamentos com dose de LE complementada com fertilizantes minerais nitrogenado e fosfatado possua maior retorno econômico que a adubação mineral.

4. OBJETIVO

4.1. Geral

Objetiva-se, com o presente estudo, avaliar o efeito de doses de LE complementado com doses de adubo mineral nitrogenado e fosfatado sobre a produção de madeira e a viabilidade econômica em cultura de *Eucaliptus grandis* após 95 meses do plantio.

4.2. Específicos

- Quantificar a produção de matéria seca da biomassa de lenho, casca, galhos e folhas e o volume de madeira obtidos nos tratamentos estudados.
- Determinar a viabilidade econômica, por meio do VPLA (Valor Presente Líquido Anualizado), em dois cenários de custo de transporte do LE a taxas de juros de 6 e 12% a.a.;
- Recomendar dose de LE complementado com N e P para plantios de eucalipto que seja mais atrativa pela produção de volume de madeira e pela viabilidade econômica.

5. MATERIAL E MÉTODO

5.1. Descrição da área experimental

O experimento foi instalado em dezembro de 2004, em uma área de 3,2 ha, na fazenda Entre Rios, da Suzano Bahia Sul Papel e Celulose S.A., localizada no município de Angatuba (22° 59' de latitude sul e 48° 41' de longitude oeste), SP. O clima deste município, segundo classificação de Köppen, é do tipo mesotérmico úmido, com precipitação média anual de 1350 mm, temperatura média anual de 19,4° C e umidade relativa de 83,3 %, podendo ocorrer geadas leves nos meses de inverno.

Na área experimental, foi realizado um levantamento pedológico que constatou dois tipos de solo, um Latossolo Vermelho distrófico na área plana do experimento e outro Neossolo Quartzarênico na parte com declividade inferior a 10%. No entanto, o Latossolo Vermelho distrófico, textura arenosa, é o solo mais representativo da área experimental. O solo experimental foi caracterizado como sendo homogêneo quanto às suas propriedades físicas (12% de argila, 4% de silte e 84% de areia) e químicas (Tabela 1) da camada de 0-40 cm de profundidade, e de baixa fertilidade, de acordo com os critérios estabelecidos no Boletim 100 do IAC (RAIJ et al., 1997).

Tabela 1 - Características químicas do solo da área experimental, antes da instalação do experimento

Prof.	pH	MO[(1)]	N	$S\text{-}SO_4^{2-}$	P	K	Ca	Mg	H+Al[(2)]	SB[(3)]	CTC[(4)]	V[(5)]
Cm	$CaCl_2$	g dm^3	g kg^{-1}	Mg kg^{-1}	mg dm^3	----------mmol$_c$ dm^3 ----------						%
0-20	3,6[(6)]	20,2	0,43	1,2	6,5	0,25	1,25	1,00	40,0	2,5	42,5	5,7
20-40	3,8	15,5	0,34	1,0	5,5	0,20	1,00	1,00	30,2	2,2	32,4	6,7

[(1)] MO – Matéria orgânica; [(2)] H+Al – Acidez; [(3)] SB – Soma de bases; [(4)] CTC – Capacidade de troca de cátions; [(5)] V – Saturação por base; [(6)] Resultados médios de 4 amostras analisadas.

5.2. Caracterização do lodo de esgoto

O LE foi fornecido pela Opersan Serviços Ambientais S.C. Ltda, empresa que gerencia o LE produzido na Estação de Tratamento de Esgotos de Jundiaí, SP, da Companhia Saneamento de Jundiaí (CSJ). O LE foi gerado em sistema de lagoas aeradas de mistura completa, seguida de lagoas de decantação, sendo o desaguamento feito com floculação à

base de polímero catiônico, seguido de centrifugação e secagem em pátio revestido, com revolvimento mecânico.

Uma amostra do LE empregada no experimento foi seca ao ar, moída e passada em peneira com abertura de malha de 2 mm. Para análise química, conforme descrito em Raij et al. (2001), a amostra foi preparada conforme recomendações do método 3051A, manual SW 846 (USEPA, 2009) e os elementos determinados por ICP-OES. O nitrogênio total e o nitrogênio amoniacal foram determinados pelo método Kjeldahl. A umidade e os sólidos voláteis foram determinados pela perda de massa a 60^{o} C e a 500^{o} C respectivamente. O carbono orgânico foi determinado com eletrodo íon seletivo após a digestão do LE com dicromato e fluoreto, por fusão com soda (Tabela 2).

Tabela 2 - Características químicas e físicas do lodo de esgoto utilizado no experimento e concentrações máximas de elementos inorgânicos permitidas pela Resolução CONAMA n^{o} 375 (CONAMA, 2006) para o uso agrícola do lodo de esgoto

Propriedade		CONAMA (concentrações máximas permitidas)
pH (em água)	6,2[(1)]	-
Umidade (%)	79	-
Sólidos voláteis (%)	65	-
Carbono orgânico (g kg^{-1})	340	-
Nitrogênio total (g kg^{-1})	33	-
N amoniacal (g kg^{-1})	3,6	-
N nitrato-nitrito (g kg^{-1})	0,018	-
Fósforo (g kg^{-1})	8,1	-
Potássio (g kg^{-1})	1	-
Cálcio (g kg^{-1})	8,1	-
Enxofre (g kg^{-1})	16,4	-
Sódio (mg kg^{-1})	997	-
Magnésio (g kg^{-1})	1,6	-
Ferro (mg kg^{-1})	16062	-
Manganês (mg kg^{-1})	483	-
Cobre (mg kg^{-1})	881	1500
Molibdênio (mg kg^{-1})	ND[(2)]	50
Zinco (mg kg^{-1})	989	2800
Arsênio (mg kg^{-1})	ND	41
Cádmio (mg kg^{-1})	11	39
Chumbo (mg kg^{-1})	85	300
Cromo (mg kg^{-1})	111	1000
Mercúrio (mg kg^{-1})	ND	17
Níquel (mg kg^{-1})	26	420
Selênio (mg kg^{-1})	ND	100
Bário (mg kg^{-1})	273	1300

[(1)] Todos os valores de concentração são apresentados com base na matéria seca; [(2)] ND - Não detectado, concentrações menores que 0,1 mg kg^{-1}.

De acordo com as características descritas na Tabela 2, as concentrações de substâncias inorgânicas presentes no LE estão em conformidade com a Resolução n° 375 (CONAMA, 2006). O LE foi classificado como tipo B.de acordo com a concentração de patógenos contidos no resíduo e o estabelecido pela Resolução CONAMA citada anteriormente.

5.3. Plantio e tratos culturais

O calcário dolomítico (PRNT= 95%) foi aplicado a lanço, em área total, na dose de 1,8 Mg ha^{-1}. A dose de calcário foi estabelecida em função de se obter uma porcentagem de saturação por bases de 45 % na camada de 0-20 cm de profundidade.

A taxa de aplicação do LE foi calculada pela eq. 1 com base no critério de nitrogênio como definido pela Resolução n° 375 (CONAMA, 2006). O valor de N recomendado foi de 142 kg ha^{-1} e o N disponível foi de 9,24 kg Mg^{-1}, considerando o fator de mineralização do LE de 0,28 e o conteúdo de N no LE de 33 g kg^{-1} (Tabela 2). Portanto, 15,4 Mg ha^{-1} de LE foi definida como sendo a dose de 100%, com base no critério de N, 7,7 Mg ha^{-1} a dose de 50% e 23,1 Mg ha^{-1} a dose de 150%.

Taxa de aplicação = [N recomendado / N disponível] (1)

Antes do plantio das mudas, foram realizadas as operações de abertura dos sulcos de plantio, adubação parcelada de KCl (54% K_2O) e herbicida (glifosato). O plantio das mudas de *Eucalyptus grandis* (clone grandis puro SP0619) foi realizado a 20 cm da faixa de aplicação do LE e sob condições de cultivo mínimo. A aplicação dos adubos nitrogenado (ureia) e fosfatado (superfosfato triplo) foi realizada manualmente em meia coroa ao redor da muda de eucalipto, conforme as doses dos respectivos tratamentos.

A adubação mineral com 142 kg ha^{-1} de N, 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 175 kg ha^{-1} de K_2O foi definida com base nas recomendações técnicas da Suzano (Gava)[2], para área de plantio comercial de eucalipto, em função das características físicas e químicas do solo e da produção esperada de madeira na ordem de 50 m^3 ha^{-1} ano^{-1}.

Desse modo, para a aplicação do adubo nitrogenado, considerando os devidos arredondamentos, fixaram-se as doses de nitrogênio em 0; 46,9; 95,1 e 142 kg ha^{-1} de N, correspondendo a 0, 33, 67 e 100 % da dose recomendada de N, respectivamente. As doses de N foram parceladas em 4 vezes (Tabela 3). Para a aplicação do adubo fosfatado, fixaram-se as doses de fósforo em 0; 28; 55,9 e 84 kg ha^{-1} de P_2O_5, correspondente a 0, 33, 67 e 100 % da dose recomendada de P respectivamente. O adubo fosfatado, no caso o superfosfato triplo, foi aplicado em dose única em pré-plantio (Tabela 3). O potássio, sendo um nutriente escasso no LE, cerca de 1 g kg^{-1}, foi aplicado em todas as parcelas experimentais, na dose de 175 kg ha^{-1}

[2]GAVA, J.L. Comunicação pessoal em setembro de 2004.

de K_2O na forma de KCl (54% K_2O), equivalente a 100% do recomendado, parcelado em 4 vezes (Tabela 3). A aplicação do KCl foi realizada com o auxilio do sulcador-aplicador, distribuindo o fertilizante em linha a 0,5 m das mudas em pré-plantio e na segunda aplicação. A terceira e quarta aplicação de KCl foram realizadas manualmente na linha de plantio.

Tabela 3 - Cronograma de aplicação dos adubos minerais nitrogenado, fosfatado e potássico no manejo da adubação do solo da área experimental

Épocas de adubação	Ureia			Superfosfato triplo			KCl
	Dose 33%	Dose 67%	Dose 100%	Dose 33%	Dose 67%	Dose 100%	(Dose única)
	---------- kg ha^{-1} ----------						
Plantio:							
23-24/12/2004	11,5	23,1	34,7	68	137	205	48,1
Pós-plantio:							
04-07 /04/2005	15,5	31,1	46,7	-	-	-	41,6
03-04/10/2005	31	62	93	-	-	-	83,2
01/11/2006	47	94	140	-	-	-	174

Os tratos culturais como capina manual e química, com aplicação de glifosato, e controle de formiga, com aplicação de iscas a base de sulfuramida, de modo localizado, nos orifícios de entrada dos formigueiros, e preventivo, distribuindo-se sistematicamente saquinhos plásticos contendo 10g de iscas, por toda a área experimental, foram todos conduzidos de acordo com os procedimentos convencionais para produção comercial de eucalipto.

5.4. Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos foram constituídos pelas quatro doses de LE (0, 50, 100 e 150% do recomendado, em função do critério do nitrogênio), quatro doses de nitrogênio (0, 33, 67 e 100% do N recomendado) e quatro doses de fósforo (0, 33, 66 e 100% do P_2O_5 recomendado) e o delineamento foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial 4x4x4, com duas repetições distribuídas em oito blocos, com 16 tratamentos por bloco, totalizando 128 parcelas. Cada parcela tinha 42 plantas na área total e 20 plantas na área útil, com bordadura simples, sendo o espaçamento de 3 x 2 m entre as plantas.

No presente trabalho, para o estudo da viabilidade econômica do LE aplicado em plantios de eucalipto, foram estudados os níveis de LE, nas doses de 0; 7,7; 15,4 e 23,1 Mg ha^{-1} , equivalentes a 0, 50, 100 e 150% do recomendada pelo critério de

N, respectivamente, complementadas com seis combinações de doses de N e P de: 142,0 - 0,0; 46,9 -28,0; 0,0 - 84; 95,1 - 55,9; 95,1 - 84,0 e 142 - 28 kg ha^{-1}, definidos aleatoriamente por sorteio.

Portanto, foram definidos 24 tratamentos e 2 tratamentos adicionais, controle (por se tratar do menor custo) e com adubação mineral (estar relacionado ao custos comumente observado na área e tido como satisfatório), com duas repetições. Desta forma, os resultados na obtenção de dados básicos de biomassa, altura comercial, circunferência de disco e comprimento de torete em 52 parcelas experimentais, representativas das diversas condições de receita e custo.

5.5. Amostragem destrutiva de árvores

Em outubro de 2012, foi mensurado no plantio do eucalipto, a altura, a circunferência na altura do peito (CAP) e o diâmetro na altura do peito (DAP). Os dados de CAP foram distribuídos em classes de frequência para a escolha prévia das árvores mais representativas de cada parcela da área experimental por meio do critério de representação das classes com maior frequência.

Após 95 meses do plantio, em novembro de 2012, três árvores mais representativas de cada parcela experimental foram abatidas, mensuradas as alturas comerciais (sem ponteiro) e divididas em folhas, galhos, lenho e casca. Ainda no campo, as folhas foram separadas dos galhos de cada árvore e avaliados os respectivos pesos de matéria fresca total, com auxilio de uma balança. Desta matéria fresca total, amostras foram colhidas, pesadas, acondicionadas em sacos de papel e levadas ao laboratório, onde foram secas em estufa a 40ºC e determinado o peso seco.

Para a amostragem de lenho, foram retirados da base das árvores e a 25, 50, 75 e 100% da altura comercial discos de aproximadamente 2 cm de espessura. Após a amostragem dos discos, foram realizadas medições dos seguimentos dos troncos das árvores (toretes) e da circunferência de cada disco, para o cálculo do volume de madeira com casca pela eq. 2 de Smalian (VEIGA, 1984).

$$V = ((A_1 + A_2)/2)*C \qquad (2)$$

Em que: V = volume em metro cúbico (m^3); A_1 = a área da extremidade menor da tora; A_2 = a área da extremidade maior da tora e C = o comprimento do torete em metro (m).

Também, foi obtido o peso fresco total dos toretes de cada árvore e o peso fresco dos discos com casca e sem casca. As amostras de discos e cascas, armazenadas em sacos de papel, foram levadas ao laboratório para determinação do peso seco, após secagem em estufa a 40ºC.

5.6. Avaliação da viabilidade econômica

A viabilidade econômica dos tratamentos estudados foi realizada pelo fluxo de caixa (receitas e custos) para quatros cenários: produtor florestal arcando com 100% e 0% do custo de transporte do lodo e a taxas de juros de 6 e 12% a.a., com objetivo de indicar a melhor recomendação de LE complementado com adubos minerais nitrogenado e fosfatado.

5.6.1 Dados de Receita

O levantamento da receita foi baseado no acréscimo de volume de madeira de eucalipto por hectare obtidos nos tratamentos com LE em relação ao tratamento controle, aos 95 meses após o plantio; e no preço de mercado da venda de madeira de eucalipto em pé para o estado de São Paulo conforme Informativo do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2013).

5.6.2 Dados de Custo

O levantamento dos custos foi baseado no conceito de custo operacional efetivo (COE), são aqueles referentes a despesas diretas de custeio incorridas pelo produtor florestal na condução de sua atividade rural (MATSUNGA et al., 1976; NORONHA, 1981). Para a determinação dos custos dos tratamentos estudados, estipularam-se os custos dos insumos, como: o LE e os fertilizantes nitrogenado e fosfatado, os quais foram utilizados para a nutrição mineral das árvores.

As variáveis de custo que são diferenciais entre os tratamentos foram determinadas, sendo elas: o valor de mercado dos fertilizantes minerais, o custo de transporte e de distribuição na área florestal para o LE e para os fertilizantes minerais. O LE foi considerado sem valor monetário, uma vez que não possui mercado próprio.

É importante descrever o contexto em que se insere a aplicação de LE neste plantio de *Eucalyptus grandis*:

1) O LE utilizado foi à base seca;
2) O custo do desaguamento, da centrifugação e da secagem do LE ficou a cargo do gerador, bem como a elaboração do projeto técnico de aplicação do LE e o monitoramento do LE e do solo nas áreas de aplicação conforme exigências da Resolução CONAMA n° 375 (CONAMA, 2006);
3) A distância entre Jundiaí (localização da ETE) até a área de aplicação do lodo (Angatuba) é de 200 km;
4) O produtor florestal receberá o LE devidamente condicionado, podendo realizar a aplicação no plantio de eucalipto, sem necessidade de custeio adicional com infraestrutura ou tratamento do resíduo;
5) Para a aplicação do LE, o produtor florestal faz uso de máquina e implementos próprios, sendo sua depreciação desconsiderada para a base de cálculo.

5.6.2.1 Transporte

O custo de transporte do LE foi baseado no valor de mercado utilizado pela transportadora que presta serviços a ETE de Jundiaí (Oliveira, 2014)[3]. O custo de transporte do LE por megagrama é de R$ 75,00 e o transporte é realizado por caminhão contendo caçamba com capacidade de 27 megagrama. Estas informações foram ajustadas para o ano de 2013 e os valores monetários são inferiores à de outras empresas do setor. Ressalta-se que o serviço oferecido é apropriado para o transporte do LE, porém dependendo das exigências da empresa a contratar, este valor de transporte do resíduo pode ser superior.

Para o custo do transporte dos fertilizantes minerais foi utilizado como referência o sítio dos Sistemas de Informações de Fretes (SIFRECA). Nesse sistema foi estipulado o custo médio de R$55 por Mg de fertilizantes minerais para uma distância de, aproximadamente, 270 Km que representa a distância do Porto de Cubatão, porto mais próximo da área de aplicação (MARCONATO, 2012), até o município de Angatuba, onde localiza-se a área experimental do presente trabalho.

[3] OLIVEIRA, F. C. Comunicado pessoal em agosto de 2014.

5.6.2.2 Distribuição do lodo de esgoto e dos fertilizantes minerais na área florestal

Para o custo total de distribuição do LE, foi considerado custo hora-máquina e custo hora-homem. A metodologia para o cálculo de custo hora-máquina foi realizada conforme proposto por Osaki (2012). Portanto, o custo hora-máquina foi determinado pela soma do custo hora-máquina do trator (eq. 3) e do distribuidor de calcário (eq. 4), não considerando o custo fixo da máquina (depreciação, seguro e juros). Para o cálculo do custo hora-máquina, considerou a distribuição de LE equivalente à distribuição de calcário, uma vez que a distribuição do LE no solo experimental do presente trabalho foi realizada com a mesma máquina e implemento agrícola utilizado para a distribuição do calcário.

Custo hora-máquina trator = (0,12*Cv*D)+ ((Vn-Vn*0,2)/Vu)*taxa manutenção (3)

Em que: Cv = potência do trator em unidade de cavalo vapor, D = preço em reais do óleo diesel por litro, Vn = valor do trator novo, Vu = vida útil do trator, taxa de manutenção preventiva com o trator.

Custo hora-máquina distribuidor de calcário= ((Vn-Vn*0,2)/Vu)*taxa manutenção (4)

Em que: Vn = valor do distribuidor de calcário novo, Vu = vida útil do distribuidor de calcário, taxa de manutenção preventiva com o distribuidor de calcário.

De acordo com o Instituto de Economia Agrícola (IEA, 2014), o valor do trator novo é de R$ 89.081,80, do diesel é de R$ 2,3 por litro e do distribuidor de calcário novo é de R$ 1.500,00 no ano de 2013. Baseado nas recomendações técnicas preventivas e a durabilidade garantida pelo fabricante, a taxa de manutenção preventiva e a vida útil para um trator de 75 cv é de 100% e de 12.000 horas, e para o distribuidor de calcário é de 80% e de 1.200 horas, respectivamente.

A determinação do custo de hora-homem foi baseada no valor da remuneração mensal do profissional tratorista (IEA, 2014). O tratorista trabalhou 220 horas (h) por mês e o rendimento médio da distribuição foi de 2,5 h ha^{-1} para o tratamento com 7,7 e 15,4 Mg ha^{-1} de LE e de 3,0 h ha^{-1} para o tratamento com 23,1 Mg ha^{-1} de LE (Madella, 2014)[4].

[4] MADELLA, J. Comunicação via email em outubro de 2014.

O custo hora-máquina foi de R$ 32,44 e o custo hora-homem de R$ 5,30. Portanto, o custo hora-máquina e hora-homem foi de R$ 95,10 ha^{-1} para o tratamento de 7,7 e de 15,4 Mg ha^{-1} de LE, e de R$ 114,12 ha^{-1} para o tratamento de 23,1 Mg ha^{-1} de LE.

Para o custo de distribuição do fertilizante mineral na área experimental do presente estudo, considerou o valor diário da mão-de-obra de R$ 48,70 para a categoria de diarista a seco[5] (IEA, 2014) e o rendimento médio da distribuição manual dos adubos nitrogenado e fosfatado de 8 horas-homem por hectare segundo (Madella, 2014)[4]. Dessa forma, o custo de distribuição de fertilizantes minerais foi de R$ 48,70 por hectare.

5.6.2.3 Fertilizante mineral

O custo do adubo nitrogenado na forma de ureia e do adubo fosfatado na forma de superfosfato triplo foi de R$ 1224,93 e de R$ 1230,43 por megagrama, respectivamente, e são referentes à média de valores do ano de 2013 para o estado de São Paulo (Osaki, 2014)[6].

5.6.3 Determinação e avaliação do valor presente líquido anualizado (VPLA)

A avaliação da viabilidade econômica do LE aplicado em plantios de eucalipto considerou o método de receita e de custo mencionados anteriormente e foi realizada por meio do valor presente líquido anualizado (VPLA), obtido conforme a eq. 5 (REZENDE; OLIVEIRA, 2001).

$$VPLA = \left(\sum_{t=0}^{n} \frac{R_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=0}^{n} \frac{C_t}{(1+i)^t} \right) * \left(\frac{i(1+i)^t}{i(1+i)^t - 1} \right) \quad (5)$$

Em que: Rt = Receita no período t; Ct = Custo no período t; i = taxa de juros.

Considerando que a ETE é responsável por operacionalizar integralmente o plano de gerenciamento do LE com destinação ambientalmente adequada aos resíduos, conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), a análise do VPLA foi baseada na

[5] Diarista a seco: compreende o trabalhador residente ou não no imóvel rural que realiza tarefas rotineiras, mediante pagamento diário de quantias pré-estabelecidas, em moeda corrente, e destituídas de encargos e benefícios sociais (IEA, 2014).
[6] OSAKI, M. Comunicado do CEPEA via email em outubro de 2014.

simulação de cenários nos quais o produtor florestal arcaria com 0 ou 100 % do custo de transporte do LE.

A taxa de juros constitui um elemento crítico na avaliação de alternativas, principalmente, em empreendimentos florestais, que são caracterizados pelo longo prazo dos investimentos (REZENDE; OLIVEIRA, 2001), e por ela variar de 6 a 12% ao ano, tradicionalmente, para projetos florestais (LIMA JÚNIOR et al., 1997), determinou-se taxa de juros de 6 e 12% a.a. para a análise da viabilidade econômica do LE aplicado em florestas de eucalipto, uma vez que, abrange os extremos de taxas de juros relatadas na literatura.

O cálculo do VPLA foi realizado utilizando-se o programa Excel. Assim, inicialmente, calculou-se o valor presente líquido (VPL) por meio do comando inserir função (f_x), optando-se pela categoria financeira e pela função VPL. Posteriormente, obtiveram-se os valores de VPLA ao ativar o comando inserir função (f_x), selecionando a categoria financeira e a função PGTO, assim preencheu-se os argumentos da função: taxa de juros, tempo e valor de VPL (SOUZA; CLEMENTE, 2004).

Para a interpretação do VPLA, considerou-se uma remuneração do capital para o produtor florestal maior que as taxas de juros de 6% e 12%. Portanto, o tratamento foi caracterizado como inviável economicamente quando o VPLA calculado for igual ou menor que zero.

5.7. Análise estatística dos resultados

Os dados foram analisados pela técnica de superfície de resposta e foram calculados por meio do sistema SAS (2010). Os dados foram interpretados com o auxílio da análise de superfície de resposta considerando os efeitos dos fatores dose de lodo, dose de nitrogênio e dose de fósforo sobre a variável dependente em estudo. O modelo de superfície de resposta é descrito pela eq. 6 de predição, considerando o nível de significância de 10 %.

$$Y = a + bL + cN + dP + eLN + fLP + gPN + hL^2 + iP^2 + jN^2 \quad (6)$$

Em que: L = a dose de lodo (Mg ha^{-1}); N = a dose de N (kg ha^{-1}); P = a dose de P_2O_5 (kg ha^{-1}) e a, b, c, d, e, f, g, h, i, j = parâmetros estimados.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Biomassa da parte aérea dos eucaliptos

A biomassa seca total e dos compartimentos do eucalipto, folha, galho, casca e lenho, responderam diretamente a aplicação de LE no plantio de *Eucalyptus grandis* aos 95 meses após o plantio, sendo que o uso de fertilizantes minerais nitrogenado e fosfatado não possui efeito sobre a variável em questão. Portanto, os resultados são apresentados apenas em função das doses de LE.

A biomassa seca total dos componentes do eucalipto aumentou com as doses de lodo (Tabela 4). A maior produção de matéria seca de biomassa total da árvore de eucalipto (187 Mg ha^{-1}) foi obtida no tratamento com 23,1 Mg ha^{-1} de LE, tanto nos troncos (lenho e casca) como na copa (folha e galho).

Tabela 4 – Biomassa seca de lenho (BSLe), de casca (BSC), de galho (BSG), de folha (BSF) e biomassa seca total (BST) aos 95 meses após o plantio do eucalipto, em função das doses de lodo de esgoto aplicadas no plantio, e as porcentagens que cada componente representa em relação a biomassa total

95 (meses)	Doses de lodo (Mg ha^{-1})				Termo de regressão (R^2)	
	0	7,7	15,4	23,1	Linear	Valor de p
	---------- Mg ha^{-1} ----------					
BSLe	119	127	134	158	0,40	0,0007
BSC	12	12	13	15	0,45	0,006
BSG	7,2	6,8	7,1	8,6	ns	0,299
BSF	3,8	3,8	4,2	5,0	0,36	0,078
BST	142	150	158	187	0,40	0,035
	---------- % ----------					
BSLe	84	84	85	84		
BSC	8	8	8	8		
BSG	5	5	4	5		
BSF	3	3	3	3		
BST	100	100	100	100		

ns = não significativo a $p \geq 0,10$

Para biomassa total, não houve efeito significativo quadrático e de interação. Verificou-se efeito linear ($p < 0,035$) para biomassa total conforme a dose crescente de LE, com confiança de 95% e coeficiente de determinação da qualidade do modelo (R^2) de 0,40, ou seja, 40 % das variações de matéria seca total dos eucaliptos respondem a dose de LE.

O efeito linear foi observado para matéria seca de lenho, casca e folha, sendo os seus coeficientes de determinação da qualidade do modelo (R^2) de 0,40, 0,45 e 0,36 respectivamente. Considerando a diversidade de fatores que poderiam interferir no ambiente florestal, mesmo com o controle da variável de solo, fertilização e clone de eucalipto proposto neste estudo, observa-se que o R^2 é satisfatório para os resultados obtidos em campo.

A produção de biomassa seca total foi 16% maior no tratamento com adubação mineral convencional (AM) quando comparada ao controle (C), 52 e 60% maior que o controle nos tratamentos de 7,7 e 15,4 Mg ha^{-1} respectivamente (Tabela 4). Lira, Guedes e Schalch (2008) obtiveram biomassa seca total para o tratamento de adubação mineral e de 10 Mg ha^{-1} de LE de 63% maior que o controle, em média 107,5 Mg ha^{-1}, após 5 anos do plantio. Portanto, observa-se que a diferença na produção de biomassa seca total entre tratamento com adubação mineral e o controle foi baixa neste estudo quando comparado ao encontrado pelos autores acima, mesmo com a aplicação do adubo potássico e do calcário no controle no presente estudo.

A produção de biomassa seca total para a adubação mineral é menor que o esperado no experimento em estudo, esta situação foi constatada neste mesmo experimento aos 43 meses após o plantio dos eucaliptos. Possivelmente, este fato pode estar associado a possíveis perdas de N por volatilização e por lixiviação, devido a não incorporação do LE ao solo e a precipitação de chuvas bem distribuídas no local do experimento, sendo que Sangoi et al. (2003) também observou perdas de N na forma de ureia em agrossistemas (FIRME, 2009).

No presente trabalho, a ordem decrescente de produção de biomassa total para os tratamentos em função do LE foi a seguinte: 23,1 > 15,4 > 7,7 > 0 (Figura 4). Observa-se que a maior dose de LE proporcionou a maior quantidade de biomassa seca, ao contrário de Lira Guedes e Schalch (2008) os quais notaram que as doses de 20 e 40 Mg ha^{-1} de LE complementados com K apresentaram valores menores de biomassa quando comparados ao tratamento de 10 Mg ha^{-1} complementado com P e K. Estas diferenças de resultados podem ser relacionadas à limitação da ausência de complementações de P e K nos tratamentos com maiores doses de LE do experimento de Lira, Guedes e Schalch; ou ainda, a forma de aplicação do resíduo ao solo e ao tipo de lodo utilizado.

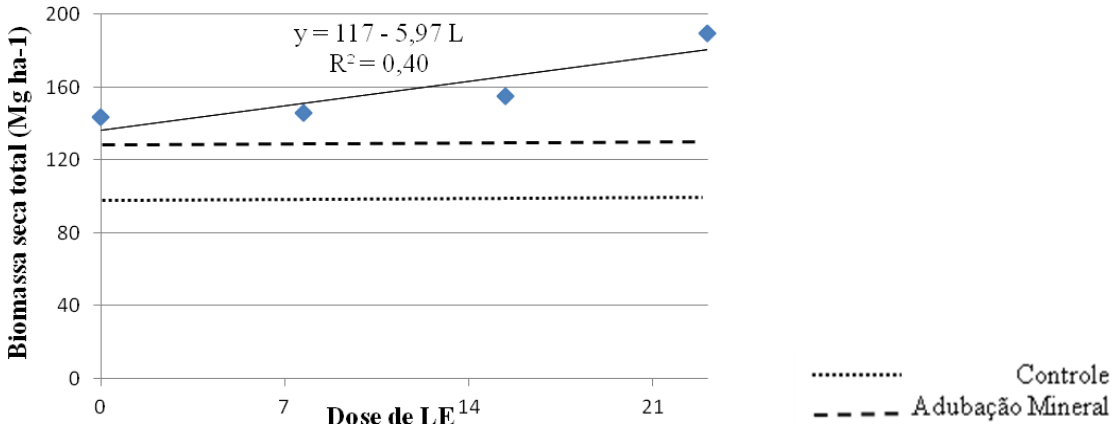

Figura 4 - Biomassa seca total em função da dose de lodo de esgoto

A quantidade de matéria seca nos componentes da árvore de eucalipto manteve a sequência lenho>casca>galho>folha para todos os tratamentos (Tabela 4). Esta tendência é corroborada pelos resultados obtidos por Soares e Oliveira (2002), Lira, Guedes e Schalch (2008) e Xu et al. (2002).

Independente do tratamento, o povoamento de *Eucalyptus grandis* forneceu aproximadamente 85% de lenho e 16% de componentes que poderão contribuir para os resíduos florestais (casca, galho e folha), os quais são importantes no manejo de cultivo mínimo (Tabela 4). Lira, Guedes e Schalch (2008) observaram que o lenho representou 75% da produção de biomassa aérea total do eucalipto cinco anos após aplicação de LE, e Safou-Matondo et al. (2005) notaram valores de aproximadamente 85% para diferentes clones de eucaliptos com 99 meses de idade, sendo que estes dados estão em consonância com os resultados verificados neste trabalho.

A maior produção de tronco (soma de lenho e de casca) foi obtida com a aplicação de 23,1 Mg ha^{-1} de LE, que gerou, 173 Mg ha^{-1} aos 95 meses após o plantio, possuindo um incremento médio anual (IMA) de 21,7 Mg ha^{-1} ano^{-1} (Tabela 5). Lira, Guedes e Schalch (2008) observaram a maior biomassa total de tronco (94,9 Mg ha^{-1}) para o tratamento de 10 Mg ha^{-1} de LE com complemento de K e P acumulada em cinco anos, o que resultou em um incremento médio anual de 19 Mg ha^{-1} ano^{-1} de madeira de eucalipto com casca. Santana, Barros e Neves (1999), estudando *Eucalyptus grandis* com 6,5 anos em cinco sítios no interior do estado de São Paulo, encontraram valores entre 95 a 206 Mg ha^{-1} de matéria seca de tronco. Gonçalves et al. (2000) obteve um potencial produtivo de 20 Mg ha^{-1} ano^{-1} para a mesma espécie em São Paulo.

Tabela 5 – Biomassa seca de tronco e seu incremento médio anual (IMA) aos 95 meses após o plantio de eucalipto em função da dose de lodo

95 (meses)	Doses de lodo				Termo de regressão (R^2)	
	0	7,7	15,4	23,1	Linear	Valor de p
	----- Mg ha^{-1}----					
	130	139	146	173	0,39	0,001
	----- Mg ha^{-1} ano^{-1}----					
IMA	16,4	17,4	18,3	21,7	0,40	0,003

A biomassa seca de tronco para a adubação mineral foi de 123 Mg ha^{-1}, sendo a média do incremento médio anual de tronco de 15 Mg ha^{-1} ano^{-1}, assim a biomassa de tronco deste tratamento é 34 % maior quando comparada ao controle, o qual obteve produção de 91 Mg ha^{-1} . E os tratamentos com dose de 7,7; 15,4 e 23,1 Mg ha^{-1} de LE são 13, 18 e 40 % maiores quando comparados à adubação mineral.

A menor produção de biomassa foi constatada no controle (91,22 Mg ha^{-1}), pois não houve entrada de nutrientes pela adubação mineral nitrogenada e fosfatada ou aplicação de LE, ao mesmo tempo, esse valor não foi menor devido a reciclagem de nutrientes via decomposição dos resíduos florestais (cultivo mínimo).

Portanto, observou-se que tanto a adubação mineral como a aplicação de LE possibilitou a produção de biomassa total aos eucaliptos superior aos valores gerados pelo controle. Verificou-se, pela análise de superfície de resposta, que apenas o lodo possui efeito sobre a biomassa seca total dos eucaliptos e que a aplicação de doses crescente de LE possibilitou a elevação da produção de biomassa seca total do povoamento de *Eucalyptus grandis* deste experimento, comprovando assim a capacidade do LE de fornecer os nutrientes N e P demandados para o desenvolvimento do eucalipto. Esta tendência foi verificada para a produção de tronco, assim o uso do LE em *Eucalyptus grandis* não prejudicaria a produção comercial de madeira, uma vez que não houve mudança na proporção de produção de biomassa entre os compartimentos do eucalipto.

6.2. Volume de madeira

6.2.1 Altura comercial

A altura comercial dos indivíduos arbóreos do povoamento de *Eucalyptus grandis* do experimento variou entre 20,4 a 25,2 m. O estudo de modelagem de superfície de resposta demonstrou efeito significativo ($p \leq 0,10$) dos tratamentos sobre a altura comercial dos eucaliptos, sendo que os incrementos nesta altura foram causados pela dose de LE e de fósforo, resultado semelhante foi registrado por Maldonado (2009) ao estudar os eucaliptos com 44 meses após o plantio neste experimento. Observou-se efeito linear, quadrático e de interação conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Altura comercial aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função da dose de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado

95 (meses)	Equação	R^2	Valor de p
Altura	$20,61 - 0,04L + 0,04P + 0,001PL + 0,002L^2 - 0,0003P^2$	0,48	0,064

Constatou-se que o modelo para a variável altura é significativo, assim há uma boa confiança sobre o que acontece na população e que 48% das variações na altura está vinculada ao uso de lodo e de adubação mineral fosfatada.

A altura comercial média obtida no experimento para o controle e a adubação mineral foi de 20,40 e 21,44 m respectivamente, estes valores foram semelhante ao valor estimado pelo modelo que foram de 20,61 e 21,85 m respectivamente, consequência de um baixo coeficiente de variação do experimento (CV= 3,82%).

As médias de altura comercial variaram, em metros, de 20,37 a 23,48; de 21,17 a 24,27; de 21,99 a 24,66 e de 23,44 a 25,16 para as doses de lodo de 0; 7,7; 15,4 e 23,1 Mg ha^{-1} respectivamente; e variaram de 20,37 a 23,48; de 21,99 a 24,66; de 21,69 a 24,78 e de 21,17 a 25,16 para as doses de fósforo de 0; 28; 55,9 e 84 kg ha^{-1} respectivamente.

Faria (2007) observou alturas totais variando entre 18,8 a 22,5 m para *Eucaliptus grandis* aos 8 anos e três meses de idades em diferentes tratamentos com lodo. Apesar de Faria trabalhar com altura total e não comercial (sem ponteiro), observa-se que os valores absolutos encontrados para altura comercial, no presente trabalho, são maiores que o descrito por Faria. Esta diferença de resultado pode estar associada ao delineamento experimental utilizado por Faria, no qual dose de P e K não foram aplicadas a todos os tratamentos de forma sistêmica o que permitiria analisar o efeito do lodo e suas complementações de fertilizantes minerais sobre a altura, uma vez que a pesquisa possuía outro escopo.

6.2.2 Volume de madeira com casca

O volume de madeira com casca dos indivíduos arbóreos do povoamento de *Eucalyptus grandis* do experimento variou entre 206 e 548 m^3 ha^{-1}. A média do volume de madeira com casca variaram, em m^3 ha^{-1}, de 206 a 458; de 265 a 538; de 281 a 548 e de 407 a 535 para as doses de lodo de 0; 7,7; 15,4 e 23,1 Mg ha^{-1} respectivamente, e variaram de 278 a 458; de 281 a 548; de 329 a 470 e de 265 a 538 para as doses de fósforo de 0; 28; 55,9 e 84 kg ha^{-1} respectivamente. Sendo observado volume de madeira com casca, em m^3 ha^{-1}, de 242 para o controle e de 333 para a adubação mineral convencional da empresa Suzano.

Faria (2007) observou volume de madeira com casca entre 238,5 a 371,4 m^3 ha^{-1} para *Eucaliptus grandis* aos 8 anos e três meses de idades em diferentes tratamentos com lodo, sendo obtido volume de madeira com casca de 243, 362 e 371 m^3 ha^{-1} para o controle, adubação mineral e 10 Mg ha^{-1} LE +KP (tratamento com maior produção de madeira) respectivamente. A amplitude e os valores de volume de madeira com casca obtidos por Faria (2007) foram menores que o observado no presente estudo, entretanto, a produção de madeira com casca foi semelhante ao controle.

O estudo de modelagem de superfície de resposta verificou efeito das doses de LE e da adubação mineral fosfatada em relação ao volume de madeira de eucalipto com casca aos 95 meses após o plantio e que 42% das variações do volume de madeira com casca está vinculada à utilização de lodo e de adubação mineral fosfatada. Foi verificado efeito linear e quadrático conforme eq. 7.

$$VCC = 271 + 8{,}26L + 3{,}08P + 0{,}24L^2 - 0{,}029P^2 \quad (R^2=0{,}42;\ p<0{,}0001) \qquad (7)$$

Estes resultados estão conforme a literatura, pois segundo Gonçalves et al. (2004) e Pulito (2009), a primeira rotação da plantação de eucalipto não apresenta resposta a fertilização nitrogenada em regiões tropicais e subtropicais. Em relação ao fósforo, Gonçalves et al. (2004) afirma que a baixa disponibilidade de P em solos altamente intemperizados tem o potencial de limitar o crescimento em regiões tropicais e subtropicais. O efeito do lodo com complementação sobre a produção de madeira com casca foi verificada por diversos autores em diferentes idades dos eucaliptos (VAZ; GONÇALVES, 2002; SILVA et al., 2008b; FARIA, 2007).

Também observou-se efeito significativo ($p \leq 0,10$) de LE e de fósforo sobre o volume de madeira com casca para este experimento aos 43 e 44 meses pós plantio de *Eucalyptus grandis* respectivamente (FIRME, 2009; MALDONADO, 2009). Assim, nota-se que a tendência de respostas da produção de madeira manteve o efeito para a fertilização mineral fosfatada e à aplicação de LE.

O efeito do fósforo evidenciado sobre a produção de madeira, e não para a biomassa seca da parte aérea dos eucaliptos, pode ser explicado pelo fato do ganho com o volume de madeira ter ocasionado, consequência indesejável, como a redução de atributos de qualidade de madeira (WANG et. al., 2006) como dureza e densidade (WANG et al., 2013).

Contudo, percebe-se uma diminuição do R^2, de 0,49 aos 43 meses para 0,42 aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, este resultado pode estar associado a variável tempo e seus efeitos em um povoamento florestal que não estão previsto pelo método de superfície de resposta. Apesar de quanto mais velho for o povoamento florestal, menor sua dependência da fertilização, porque a ciclagem de nutrientes por si só atende grande parte das exigências nutricionais das árvores, verificou-se que os eucaliptos do experimento ainda expressam o crescimento alcançado nos estágios iniciais sobre o volume de madeira com casca aos 95 meses pós-plantio.

Avaliando-se os fatores de lodo e P dois a dois e fixando-se o nível de um dos fatores, os seguintes resultados foram obtidos: a) observou-se que o aumento no volume de madeira com casca, causado pelas doses de lodo, ocorreu para todas as doses de P_2O_5; b) notou-se que o aumento no volume de madeira com casca causado pelas doses de P ocorreu para a dose de 23,1 Mg ha^{-1} de lodo ; c) observou-se que a dose de fósforo de 28 kg ha^{-1} proporcionou volume de madeira maior, em valor absoluto, que a dose de 55,9 de P_2O_5 para as doses de lodo de 0; 7,7 e 15,4 Mg ha^{-1} (Tabela 7).

Tabela 7 – Volume de madeira com casca e seu incremento em relação ao controle aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto (L) e de adubo mineral fosfatado (P)

		Fósforo (P_2O_5, kg ha^{-1})				Efeito de P	
Lodo (Mg ha^{-1})		0	28	55,9	84	Linear	Quadrático
		---------- m^3 ha^{-1} ----------					
0		314 (-7)[1]	330 (-2)	329 (-2)	333 (1)	*	ns
7,7		329 (-2)	402 (20)	359 (7)	401 (19)	*	ns
15,4		369 (10)	414 (23)	370 (10)	442 (26)	*	ns
23,1		407 (21)	438 (30)	470 (40)	529 (58)	*	*
Efeito de L	Linear	*	*	*	*		
	Quadrático	*	*	*	*		

Em que: ns = $p > 0,10$ e * = $p \leq 0,10$.

[1]Valor, entre parênteses, representa a diferença percentual de produção em relação ao tratamento de adubação mineral convencional.

Pela análise de superfície de resposta não foi obtido o ponto máximo, e sim o ponto sela. Como o ponto sela não é um bom substituto para o ponto de máximo não encontrado, utilizou-se o ponto de máximo experimental (SANCHES; NOGUEIRA; PERECIN, 1989).

Por meio do modelo estatístico, o volume máximo de madeira de eucalipto com casca foi de 544 m^3 ha^{-1}, aplicando 23,1 Mg ha^{-1} de LE com a complementação, via fertilizante mineral, de 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 e dispensando a aplicação de N, sendo que este mesmo tratamento obteve volume de madeira com casca de 535 m^3 ha^{-1} pela análise do resultado obtido em campo.

Os maiores resultados para a dose de 23,1 Mg ha^{-1} de LE não é semelhante ao observado no experimento de Itatinga aos 99 meses após a aplicação de LE, que obteve maior produção de madeira com casca para a dose de 10 Mg ha^{-1} com complementação de K e P, sendo que as maiores doses de lodo, 20 e 40 Mg ha^{-1}, com complementação de K, tiveram os menores volumes de madeira. De acordo com Faria (2007), os conteúdos de K e P não foram capazes de suprir as necessidades das plantas por esses nutrientes.

O fato da maior dose de LE ter proporcionado maiores volumes de madeira pode ser explicado pelo delineamento do experimento contemplar combinações de lodo e fertilizantes minerais com macronutrientes associado à aplicação do lodo em faixa de 60 cm na linha de plantio, o que possivelmente colaborou para um ambiente ótimo para o desenvolvimento dos

eucaliptos jovens. Associado a isto, a degradação da MO presente no LE facilmente degradável foi exaurida e permitiu uma elevada atividade microbiana no solo, a qual foi mantida por meio da degradação da MO original do solo.

O método de parcelas gêmeas, que utiliza fertilização extra quando comparado à adubação mineral recomendada apenas na reposição dos nutrientes exportados na colheita, pode-se equiparar a este delineamento experimental no quesito de analisar doses de nutrientes extras. Desse modo, verificou-se que o volume de madeira obtido em parcela com fertilização extra foi de 51 m^3 ha^{-1} ano^{-1} para eucaliptos de 2 a 6 anos de idade, próximo ao encontrado neste estudo (STAPE et al., 2006). Além disso, clones da espécie *Eucalyptus grandis* são mais eficientes no uso dos principais nutrientes e mais produtivos (SAFOU-MATONDO et al., 2005).

Como a Resolução CONAMA n° 375 possui o escopo de prevenção da contaminação do ambiente agrícola e determina a recomendação de lodo baseada no critério de N, este estudo avaliou e indicou o melhor tratamento respeitando esta norma legal e vigente. Portanto, as doses de lodo analisadas foram as de 7,7 e 15,4 Mg ha^{-1} que corresponde aos 50 e 100% de LE recomendado.

A dose 100 % de lodo, recomendada com base no critério do N, proporcionou volume médio de madeira com casca 26 % maior que o tratamento com aplicação de adubo mineral de modo convencional (336 m^3 ha^{-1} de madeira), com o uso de 100% de P_2O_5 e redução de 100% da dose de N; e obteve-se volume médio de madeira com casca 23% maior que o tratamento com adubação mineral para o tratamento com o uso de 33 % da dose de adubo mineral fosfatado e 0% do adubo mineral nitrogenado recomendado para o eucalipto.

Porém, com objetivo de indicar a recomendação que propõe maiores reduções ao produtor florestal, sugere-se a aplicação de 7,7 Mg ha^{-1} de LE, 50% da dose recomendada com base no critério do N, e de 28 kg ha^{-1} de adubo fosfatado , 33% da dose recomendada de P_2O_5, o qual possibilitou um volume médio de madeira com casca 20 % maior que o tratamento com adubação mineral, com redução de 50% de lodo, 66 % da dose de superfosfato triplo e 100% de ureia. A aplicação de 7,7 Mg ha^{-1} de LE não acarretou em prejuízos significativo na produção de madeira e permitiu reduzir a quantidade de fertilizante fosfatado.

A média do incremento médio anual (IMA) variou entre 39 e 66 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (Tabela 8). De maneira geral, os maiores incrementos médios anuais foram para as doses de 23,1 Mg ha^{-1} LE e para as doses de 84 kg ha^{-1}de P_2O_5. No tratamento com adubação mineral convencional, o IMA obtido foi de 42 m^3 ha^{-1} ano^{-1}, assim, não alcançando o valor esperado

pela empresa Suzano de 50 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. Porém, o IMA deste tratamento está próximo da produtividade média observada para o Brasil de 40,7 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (ABRAF, 2013).

Tabela 8 – Incremento médio anual (IMA) aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado

Lodo (Mg ha^{-1})	Fósforo (P_2O_5, kg ha^{-1})				R^2	Valor de p
	0	28	55,9	84		
	---------- m^3 ha^{-1} ano^{-1}----------					
0	39	41	41	42	0,39	0,001
7,7	41	50	45	50	0,43	0,007
15,4	46	52	46	53	0,41	0,029
23,1	51	55	59	66	0,40	0,031

Neste estudo, os resultados obtidos para o IMA estão maiores que o encontrado na literatura tradicional que realiza a fertilização mineral com base apenas na reposição dos nutrientes exportados pela colheita. Contudo, pelo método de parcelas gêmeas, que visa analisar o efeito da fertilização mineral extra sobre a produção florestal, foi verificado IMA médio entre 41 e 62 m^3 ha^{-1} ano^{-1} para três regiões do estado de São Paulo analisadas aos 7 anos de idade do eucalipto e IMA máximo entre 57 e 82 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (SILVA, 2011).

Para a dose de 100% de LE, 100% de P_2O_5 e 0% de N, observou-se o volume médio de 53 m^3 ha^{-1} ano^{-1} de madeira de eucalipto com casca, já para a dose de 100% de LE, 33% de P_2O_5 e 0% de N, verificou-se a produtividade média de 52 m^3 ha^{-1} ano^{-1}; e para a dose de 50% de LE, 33% de P_2O_5 e 0% de N obteve a produção média de 50 m^3 ha^{-1} ano^{-1} de madeira com casca.

A produção de madeira na adubação mineral convencional foi 8% maior que o valor obtido no controle. Esta diferença foi de 6% aos 43 meses pós-plantio para o mesmo experimento (FIRME, 2009). Faria (2007), obteve uma diferença de 49% aos 99 meses pós-plantio. Portanto, assim como na biomassa seca total, a adubação mineral obteve valores de produção de volume de madeira de eucaliptos abaixo do esperado.

O manejo de cultivo mínimo utilizado na área experimental proporcionou que o tratamento controle possuísse positivos resultados de volume de madeira com casca pela disponibilização de N e P lábil a partir da decomposição, lenta e gradual, dos resíduos vegetais deixados na superfície e na camada superior do solo, permitindo maior sustentabilidade do sistema devido à manutenção de nutrientes na área (GONÇALVES et al., 2000; GATTO et al., 2003).

6.2.3 Volume de madeira sem casca

O volume de madeira sem casca dos indivíduos arbóreos do povoamento de *Eucalyptus grandis* do experimento variou entre 178 e 479 m^3 ha^{-1}. O volume de madeira sem casca variaram, em m^3 ha^{-1}, de 178 a 404; de 238 a 479; de 237 a 466 e de 336 a 469 para as doses de lodo de 0; 7,7; 15,4 e 23,1 Mg ha^{-1} respectivamente, e variaram de 178 a 404; de 237 a 466; de 285 a 406 e de 237 a 479 para as doses de fósforo de 0; 28; 55,9 e 84 kg ha^{-1} respectivamente. Sendo observado volume de madeira sem casca, em m^3 ha^{-1}, de 215 para controle e de 302 para adubação mineral.

Faria (2007) observou volume de madeira sem casca entre 214,2 a 340,6 m para *Eucaliptus grandis* aos 8 anos e três meses de idades em diferentes tratamentos com lodo, sendo obtido volume de madeira sem casca de 224,5; 337,0 e 340,6 m^3 ha^{-1} para controle, adubação mineral e 10 Mg ha^{-1} LE +KP (tratamento com maior produção de madeira) respectivamente. Os valores encontrados no presente estudo possuem uma amplitude maior que o apresentado por Faria (2007), possivelmente, devido a maior introdução de NPK via fertilizante mineral no primeiro, porém, observa-se proximidade entre os valores de volume de madeira sem casca para o controle, mantendo a tendência verificada para o volume de madeira com casca.

De maneira geral, o volume de madeira sem casca seguiu a tendência dos resultados obtidos pelo volume de madeira com casca, desse modo, observou-se o efeito significativo ($p \leq 0,10$) da aplicação de LE e da adubação fosfatada sobre a produção de madeira sem casca. No presente trabalho, o foco da analise será na madeira com casca, uma vez que é a variável utilizada para o cálculo da receita na análise de viabilidade econômica, o qual considera dados do preço de madeira em pé.

6.3. Avaliação da viabilidade econômica

6.3.1 Análise de custo

O custo para a aplicação de fertilizante mineral é composto pelas variáveis de transporte e distribuição do adubo mineral e pelo valor do próprio insumo agrícola (ureia e superfosfato simples). No uso de adubo mineral nos tratamentos deste experimento, a maior parte do custo é referente ao valor do produto fertilizante mineral, seguido do custo de distribuição na área florestal e de transporte respectivamente. Assim, no tratamento com adubação mineral convencional para o plantio de *Eucalyptus grandis* neste experimento para cada hectare, o custo do transporte foi de R$12,43 (2% do custo total), da distribuição (sem incorporação) foi de R$ 97,40 (13% do custo total) e do produto foi de R$ 637,36 (85% do custo total) (Figura 5).

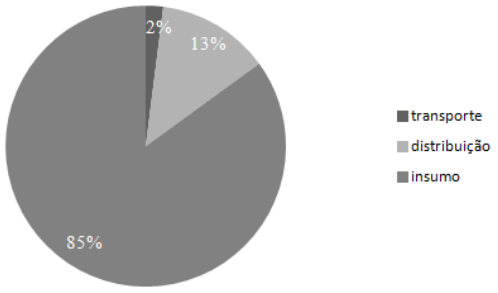

Figura 5 – Composição do custo, em porcentagem, para a adubação mineral convencional no experimento em estudo.

O custo para a aplicação de LE contempla os valores relacionados ao transporte e à sua distribuição no solo. Constatou-se que o maior custo é referente ao transporte, como já observado na literatura (HENRY; COLE, 1997; TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2005; FARIA, 2007). O custo de transporte do lodo foi de R$ 577,50 ha^{-1}(86% do custo total), R$ 1.155,00 ha^{-1} (92% do custo total) e de R$ 1.732,50 ha^{-1} (95% do custo total) para a aplicação de 7,7 ; 15,4 e 23,2 Mg ha^{-1} respectivamente (Figura 6).

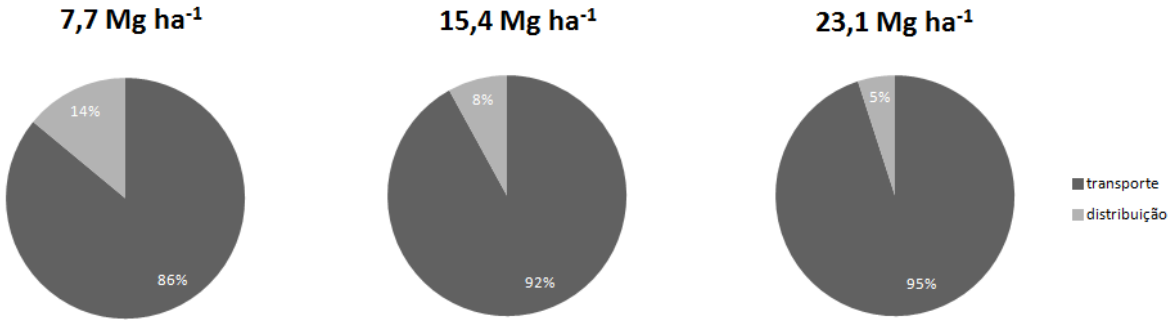

Figura 6 – Composição do custo, em porcentagem, para a aplicação de três doses de lodo de esgoto usadas no experimento em estudo.

De acordo com Faria (2007), se aplicasse 20 Mg ha^{-1} em base seca, com 29% de teores de sólidos, o custo do frete representaria 80% do custo total para a distância de transporte de 200 km. Esta informação está em consonância com os resultados aqui apresentados, uma vez que o custo do transporte do lodo representou acima de 85% dos custos totais, independente da dose de lodo aplicada.

Como o experimento foi delineado considerando a interação entre doses de N, P e LE, analisou-se os custos, receitas e VPLA´s por tratamento. O menor custo foi verificado no controle (0 R$ ha^{-1}), seguido de todos os tratamentos que não utilizaram LE, sendo o custo para a fertilização mineral convencional de 747,18 R$ ha^{-1}. Os maiores custos foram obtidos para todos os tratamentos com a dose de lodo de 23, 1 Mg ha^{-1}, independente da dose do fertilizante mineral, os quais variaram entre 2.160,43 e 2.463,59 R$ ha^{-1}. Portanto, observa-se que o custo de transporte de lodo impactou no custo total para os tratamentos que fizeram uso deste resíduo.

Apesar do custo de transporte do lodo ser responsável pela maior parte do custo total dos tratamentos que o utilizaram, variáveis como o volume, a distância e a periodicidade do transporte podem interferir consideravelmente nas análises de viabilidade econômica. Neste trabalho, o volume considerado foi àquele referente às doses de lodo (7,7; 15,4 e 23,1 Mg ha^{-1}) e a periodicidade não foi considerada.

Quanto ao custo de distribuição do lodo no campo, dependerá do equipamento utilizado, das características geográficas do local, da consistência do lodo e do tipo e idade da cultura (FARIA, 2007). Desta maneira, lodo com base úmida, teores de sólido entre 3 a 6%, só é viável nas proximidades da ETE, devido ao alto custo com transporte e também pela questão de segurança do transporte deste resíduo, sendo sua vantagem a utilização do mesmo caminhão tanque para retirada do lodo na ETE e, posteriormente, na sua distribuição na área florestal (DUNN, 2000).

O lodo na agricultura é mais viável economicamente quanto comparado a sua destinação à aterro sanitário (TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2005; SINGH; AGRAWAL, 2007). O custo médio de disposição em aterro sanitário é de R$ 110 para lodo com até 18% de sólidos no estado de São Paulo (FARIA, 2007). Conforme o presente estudo, o custo total para aplicação de LE no plantio florestal é de 672; 1220 e 1843 reais para as doses de 7,7; 15,4 e 23,1 Mg ha^{-1} respectivamente, sendo que o custo para a disposição em aterro sanitário, sem considerar o transporte do lodo até o aterro, seria de 770; 1540 e 2310 reais para as doses de 7,7; 15,4 e 23,1 Mg respectivamente.

6.3.2 Análise de receita

Como o presente estudo objetivou avaliar o manejo mais viável do LE pelo aspecto econômico para o plantio de *Eucalyptus grandis*, foi utilizada a receita adicional para cada tratamento, a qual é obtida quando a receita de um determinado tratamento é comparada com a receita obtida no controle. Assim, a receita adicional refletirá o resultado da fertilização realizada em cada tratamento deste experimento.

As receitas adicionais mantiveram a tendência dos resultados alcançados na produção de madeira de eucalipto com casca para os diferentes tratamentos, uma vez que as receitas foram calculas em relação ao preço da madeira em pé, R$ 49,03 m^3, o qual é constante (Tabela 9). Considerando o efeito de LE e fósforo sobre a produção de madeira, a receita adicional máxima foi obtida para o tratamento com 23,1 Mg ha^{-1} de LE, 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 e sem o uso de fertilizante mineral nitrogenado. A menor receita adicional foi observada para o controle e para aqueles sem uso de LE e fertilizante fosfatado, independente da dose de fertilizante nitrogenado utilizada.

Tabela 9 – Receita total e adicional obtida aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado

Lodo (Mg ha^{-1})	Fósforo (P_2O_5, kg ha^{-1})			
	0	28	55,9	84
	---------- R$ ha^{-1} ----------			
0	15.399 (3.522)[1]	16.181 (4.303)	16.108 (4.230)	16.330 (4.453)
7,7	16.119 (4.241)	19.721 (7.844)	17.604 (5.726)	19.671 (7.794)
15,4	18.111 (6.234)	20.314 (8.436)	18.122 (6.245)	20.789 (8.911)
23,1	19.933 (8.055)	21.475 (9.598)	23.044 (11.167)	25.937 (14.059)

[1]Valor, entre parênteses, representa receita adicional em relação ao controle.

As receitas adicionais variaram entre 1091,16 a 14.496,45 R$ ha^{-1} e a fertilização mineral convencional teve a receita adicional de 4.432,47 R$ ha^{-1}. Faria (2007) obteve receitas adicionais entre -664,73 a 3.093,33 R$ ha^{-1}, sendo que verificou valor de 3.025,98 R$ ha^{-1} para o tratamento com adubação mineral e o melhor resultado de receita adicional, de 3.093,33 R$ ha^{-1}, foi verificado para o tratamento de 15 Mg ha^{-1} LE com complementação de K. As diferenças constatadas entre estes estudos se deve ao fato de Faria (2007) utilizar o valor de madeira em pé de 32,83 R$ st^{-1}, equivalente a 21,90 R$ m^3, e a diferença nas doses de NPK utilizadas no experimento, que afetou na produção de madeira em pé.

6.3.3 Avaliação do VPLA

Cenário 1- Produtor florestal arcando com custo de transporte: Taxas de juros de 6% a.a.

Considerando que o produtor floresta arcou com 100% do custo do transporte do LE e que a taxa de juros é de 6% a.a., o valor presente líquido anualizado (VPLA) mínimo e máximo foi de -43 e de 1.511 R$ ha^{-1} ano^{-1} respectivamente. Dos tratamentos analisados, 8% possuem VPLA $\leq$ 0, ou seja, estes tratamentos não são viáveis economicamente, sendo eles: o tratamento com 7,7 Mg ha^{-1} de LE, 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 e com redução de 100% de

nitrogênio e com 15,4 Mg ha^{-1} LE, 28 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 46,9 kg ha^{-1} de N, possuindo, respectivamente, os VPLA´s de -43 e de -39 R$ ha^{-1} ano^{-1}. Estes dois tratamentos obtiveram o menor volume de madeira de eucalipto com casca em relação à média verificada na produção de madeira para suas doses de lodo e de fósforo, impactando negativamente nos seus VPLA´s médios.

Sabendo que o efeito de LE e P_2O_5 foi significativo sobre o volume de madeira com casca, as médias dos VPLA´s para a realidade deste experimento foram maiores que zero, ou seja, considerando a interferência de lodo e fósforo mineral na produção de madeira, todos os tratamentos foram viáveis economicamente (Tabela 10). Portanto, os dois tratamentos com VPLA negativos citados acima não interferiram nas médias de VPLA´s, mantendo-se os VPLA´s positivos em função da dose de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado.

Tabela 10 – VPLA aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado, considerando taxa de juro de 6 % a.a.

Lodo (Mg ha^{-1})	Fósforo (P_2O_5, kg ha^{-1})			
	0	28	55,9	84
	---------- R$ ha^{-1} ano^{-1}----------			
0	398	455	432	468
7,7	311	747	480	734
15,4	451	720	444	768
23,1	567	760	928	1.284

O VPLA máximo foi obtido para o tratamento com dose de 23, 1 Mg ha^{-1} LE, 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 e sem o uso de N. Como o presente estudo visa atender a norma de recomendação de aplicação de LE, com base no critério N estipulado pela Resolução CONAMA n° 375, o qual possui como um de seus objetivos evitar a contaminação ambiental, as análises dos VPLA´s foram focadas nos resultados obtidos para o uso de 0; 7,7 e 15,4 Mg ha^{-1} de LE recomendado.

A dose de 15,4 Mg ha^{-1} de LE, recomendada com base no critério do N, apresentou VPLA igual a 768 R$ ha^{-1} ano^{-1}, 63 % maior do que o tratamento com aplicação de adubo mineral de modo convencional (471 R$ ha^{-1}), com o uso de 84 kg ha^{-1} P_2O_5 e redução de 100% da dose de adubo mineral nitrogenado, sendo obtido VPLA de 720 R$ ha^{-1} ano^{-1}, 53 %

maior que o tratamento com adubação mineral convencional, com redução de 67 % da dose de adubo mineral fosfatado e de 100% do adubo mineral nitrogenado. Desse modo, para a dose de 15,4 Mg ha^{-1} de LE, observa-se que a produção de madeira obtida com 100% de adubo fosfatado causou maior impacto positivo no VPLA médio que a economia de custos com a redução de 67% de P_2O_5.

Em relação à aplicação de 7,7 Mg ha^{-1} de LE, 50% da dose recomendada com base no critério do N, de 33% da dose de P_2O_5 e de 0% de N, obteve-se o VPLA médio de 747 R$ ha^{-1} ano^{-1}, apesar da viabilidade econômica deste tratamento, o valor de seu VPLA médio é menor que aquele encontrado para a dose de 100% de lodo, 100% de P_2O_5 e redução de 100% de N. Porém seu VPLA médio é maior que o encontrado para 100% lodo, 33% de P_2O_5 e redução de 100% de N, uma vez que é 59% maior que o tratamento com aplicação de adubo mineral de modo convencional.

Portanto, o tratamento que possui maior retorno econômico é o com aplicação de 100% de LE, 100% de P_2O_5 e com redução de 100% adubo mineral nitrogenado. Desse modo, apesar da possibilidade verificada na análise da produção de madeira com casca, a redução de 50% de LE, 67% da dose de adubo mineral fosfatado e 100% do nitrogenado não foi suficiente para indicá-lo como melhor manejo pelo aspecto econômico.

Cenário 2- Produtor florestal arcando com custo de transporte: Taxas de juros de 12% a.a.

Considerando que o produtor floresta arcou com 100% do custo do transporte do LE e que a taxa de juros é de 12% a.a., o Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA) oscilou entre -117 e 1.188 R$ ha^{-1}, dependendo do tratamento de adubação utilizados neste experimento. Dos tratamentos analisados, 8% possuem VPLA ≤ 0, ou seja, estes tratamentos não são viáveis economicamente, e são eles: o tratamento com 7,7 Mg ha^{-1} de LE, 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 e com redução de 100% de nitrogênio e com 15,4 Mg ha^{-1} LE, 28 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 46,9 kg ha^{-1} de N, possuindo, respectivamente, os VPLA´s de -92 e de -117 R$ ha^{-1} ano^{-1}. Estes tratamentos seguiu a mesma tendência observada para o cenário 1.

Como esperado, considerando taxas de juros de 12% a.a., os valores de VPLA foram menores quando comparados aos valores obtidos com taxas de juros de 6% a.a., evidenciando a sensibilidade da metodologia do VPLA a diferentes taxas de juros, conforme mencionado na literatura, principalmente, quando a dimensão temporal é relevante, como ocorre em empreendimentos florestais (REZENDE; OLIVEIRA, 2001).

Como o efeito de LE e P_2O_5 foi significativo sobre o volume de madeira de eucalipto com casca, as médias dos VPLA´s para a realidade deste experimento foram maiores que zero, ou seja, todos os tratamentos, considerando a interferência de lodo e fósforo na produção de madeira, foram viáveis economicamente (Tabela 11). Assim, os dois tratamentos com VPLA negativos citados acima não interferiram nas médias de VPLA´s, mantendo-se os VPLA´s positivos em função da dose de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado.

Assim como observado para a taxa de juros de 6% a.a., o VPLA máximo foi obtido para o tratamento com dose de 150% de LE, 100% de P_2O_5 e com redução de 100% de N. A análise dos VPLA´s para os diferentes tratamentos seguiu a mesma tendência verificada para os valores com taxa de juros de 6% a.a., porém com valores menores, devido à taxa de juros de 12% a.a.. Desse modo, o tratamento que possui melhor resultado econômico foi aquele com aplicação de 7,7 Mg ha^{-1} de LE, 28 kg ha^{-1} de P_2O_5 e com redução de 100% de adubo mineral nitrogenado, o qual apresentou VPLA de 562 R$ ha^{-1} ano^{-1}, 47 % maior que o tratamento com aplicação de adubação mineral convencional (370 R$ ha^{-1} ano^{-1}).

Tabela 11 – VPLA aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado, considerando taxa de juro de 12 % a.a.

Lodo (Mg ha^{-1})	Fósforo (P_2O_5, kg ha^{-1})			
	0	28	55,9	84
	---------- R$ ha^{-1} ano^{-1}----------			
0	325	361	337	369
7,7	198	562	335	548
15,4	282	508	274	545
23,1	346	508	643	942

Ao estudar a aplicação de doses de 5, 10, 20 e 40 Mg ha^{-1} de LE, tratado com cal hidratada e cloreto férrico, complementadas com K e,ou, P em *Eucalyptus grandis* aos 99 meses de idade, verificou-se que a maior taxa de lodo, 40 Mg ha^{-1} com complementação de potássio mineral, e a dose única de 10 Mg ha^{-1} não foram economicamente viáveis e a dose de 20 Mg ha^{-1} com potássio mineral foi viável apenas em distâncias inferiores a 5 km da ETE. Este resultado é reflexo dos baixos ganhos de produção em relação ao controle, ou nenhum no caso da não complementação, associado ao alto custo de utilização do LE, devido às altas

taxas utilizadas e à elevada umidade no lodo. Isso evidencia que altas doses de aplicação de lodo devem ser evitadas pelo ponto de vista econômico (FARIA, 2007).

Ainda em relação ao trabalho supracitado, conclui-se que a taxa de 5 Mg ha^{-1} de LE foi a que proporcionou o melhor resultado econômico, sendo que o resultado foi atribuído ao elevado ganho de produção, semelhante ao da adubação mineral, aliado ao menor custo de utilização. O VPLA máximo foi de 550 R$ ha^{-1} ano^{-1} e ao passo que a distância de transporte de lodo foi aumentada, o VPLA diminuiu, atingindo valores negativos, ou seja, o tratamento foi considerado inviável economicamente. Foi obtido VPLA´s positivos para certas taxas de aplicação de LE e certas distâncias de seu transporte, porém nenhuma taxa de aplicação de lodo, complementada ou não com fertilizante mineral, resultou em VPLA equivalente ao obtido pela fertilização convencional para eucaliptos (FARIA, 2007).

No presente estudo, os resultados foram diferentes, pois: a) o delineamento experimental permitiu a análise das interações em esquema fatorial entre LE, P e N, observando que, de maneira geral, conforme se eleva a dose de LE e P, aumenta-se a resposta de volume de madeira com casca. Faria (2007) observou baixos incrementos de produção de madeira para a dose de lodo de 20 e 40 Mg ha^{-1} (maiores doses de LE) com complementação de K, em relação ao controle; b) a maior produção de madeira com casca para o tratamento de 23,1 Mg ha^{-1} de LE compensou o alto custo com a aplicação de LE, superando o VPLA do adubo mineral; e c) a produção de madeira com casca obtida no tratamento 7,7 e 15,4 Mg ha^{-1} de lodo foi compensada pelo elevado custo com a aplicação de LE apenas para os tratamentos com 28 e 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 quando comparada à adubação mineral.

Cenário 3- Produtor florestal isento do custo de transporte : Taxas de juros de 6% a.a.

Conforme a Agência de Proteção Ambiental estadunidense, se o usuário do LE tiver que arcar com os custos totais de aplicação (transporte, aplicação, monitoramento entre outros), o seu uso será limitado, mesmo sendo essa uma alternativa de manejo mais viável economicamente para o lodo (USEPA, 1999). Faria (2007) afirmou que o produtor florestal que já realiza a fertilização convencional dificilmente se sentiria atraído ao uso do LE caso não fosse incentivado a isso, como, por exemplo, arcando somente com o pagamento de parte dos custos de utilização deste resíduo.

Estes pareceres diferem dos resultados encontrados no presente estudo, pois aqui foi considerado como custo total para a aplicação de LE no povoamento de *Eucalyptus grandis* para o produtor florestal o custo com transporte e distribuição do LE no solo, não envolvendo

custo com elaboração de projeto técnico, monitoramento do LE e do solo sob aplicação deste resíduo, uma vez que se considerou que estes custos foram arcados pela ETE, a qual é responsável pela geração de seu resíduo. Além disso, observou-se que as maiores produções foram as que alcançaram os melhores resultados econômicos.

Ainda assim, considerou-se que o produtor floresta não precisou arcar com o custo de transporte do LE e que a taxa de juros é de 6 % a.a., o Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA) variou entre 54,52 e 1.565,91 R$ ha^{-1} ano^{-1}, dependendo do tratamento de adubação utilizados neste experimento. Dos tratamentos analisados, 100% possuem VPLA ≥ 0, ou seja, todos os tratamentos são viáveis economicamente.

Assim, como observado para os cenários 1 e 2, o VPLA máximo foi obtido para o tratamento com dose de 150% de LE, 100% de P_2O_5 e com redução de 100% de N (Tabela 12). O tratamento que possuiu o maior retorno econômico também foi aquele com aplicação de 15,4 Mg ha^{-1} de LE, 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 e com redução de 100% de adubo mineral nitrogenado, o qual apresentou VPLA de 964 R$ ha^{-1} ano^{-1}, 105 % maior do que o tratamento com aplicação de adubação mineral convencional (470,00 R$ ha^{-1} ano^{-1}).

Tabela 12 – VPLA aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado, considerando que o produtor florestal é isento do custo de transporte e a taxa de juro é de 6 % a.a.

Lodo (Mg ha^{-1})	Fósforo (P_2O_5, kg ha^{-1})			
	0	28	55,9	84
	---------- R$ ha^{-1} ano^{-1}----------			
0	398	455	432	468
7,7	408	845	578	831
15,4	646	915	640	964
23,1	860	1.052	1.220	1.577

Cenário 4 - Produtor florestal isento do custo de transporte: Taxas de juros de 12% a.a.

Sabendo que o produtor floresta não arcou com o custo de transporte do LE e que a taxa de juros é de 12 % a.a., o VPLA mínimo e máximo foi de 21,26 e 1359,09 R$ ha^{-1} ano^{-1} respectivamente, dependendo do tratamento de adubação utilizados neste experimento. Dos

tratamentos analisados, 100% possuem VPLA ≥ 0, ou seja, todos os tratamentos são viáveis economicamente.

Desta maneira, como observado para os cenários 1, 2 e 3, o VPLA máximo foi obtido para o tratamento com dose de 150% de LE, 100% de P_2O_5 e com redução de 100% de N (Tabela 13). O tratamento que possuiu o melhor resultado econômico também foi aquele com aplicação de 15,4 Mg ha^{-1} de LE, 84 kg ha^{-1} de P_2O_5 e com redução de 100% adubo mineral nitrogenado, o qual apresentou VPLA médio de 771 R$ ha^{-1} ano^{-1}, 108 % maior do que o tratamento com aplicação de adubação mineral convencional (370,00 R$ ha^{-1} ano^{-1}).

Tabela 13 – VPLA aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos, em função das doses de lodo de esgoto e de adubo mineral fosfatado, considerando que o produtor florestal é isento do custo de transporte e taxa de juro de 12 % a.a.

Lodo (Mg ha^{-1})	Fósforo (P_2O_5, kg ha^{-1})			
	0	28	55,9	84
	---------- R$ ha^{-1} ano^{-1}----------			
0	325	361	337	369
7,7	310	675	448	661
15,4	508	734	500	771
23,1	685	847	982	1.280

Portanto, para o cenário 1, 3 e 4, o maior VPLA foi obtido para o tratamento com aplicação de 100% de LE, 100% de P_2O_5 e 0% de N; já para o cenário 2, o melhor resultado econômico foi para o uso de 50% de LE, 33% de P_2O_5 e 0% de N, assim, mesmo com menor produção de volume de madeira quando comparado aos outros tratamentos, a redução de custos de transporte de lodo e de aplicação de fertilizante fosfatado, possibilitou que este tratamento possuísse o maior VPLA para este cenário.

Como esperado, o cenário 3 foi o mais favorável, pois considerou que o produtor florestal não arcaria com custo de transporte de lodo e baseou-se em uma taxa de juros de 6% a.a., assim obteve-se VPLA médio de 964 R$ ha^{-1} ano^{-1}. O cenário 2 foi o que obteve menor retorno, uma vez que o produtor florestal foi responsabilizado pelo custo do transporte do resíduo, assumindo VPLA médio de 562 R$ ha^{-1} ano^{-1} (Tabela 14).

Tabela 14 – Maior valor de VPLA para cada cenário aos 95 meses após o plantio dos eucaliptos

Taxa de juros	**Com Custo de Transporte**	**Sem custo de Transporte**
(% a.a.)	---------- R$ ha^{-1} ano^{-1}----------	
6	768	964
12	562	771

Observa-se que o cenário 4 possui VPLA médio (771 R$ ha^{-1} ano^{-1}) maior que o cenário 1 (768 R$ ha^{-1} ano^{-1}), apesar da diferença de apenas 3 R$ ha^{-1} ano^{-1}, este fato permite afirmar que a influência positiva da isenção do custo de transporte sobre o valor do VPLA médio é maior que a possibilidade de reduções da taxa de juros para o produtor florestal neste experimento.

7. CONCLUSÃO

A aplicação de LE contribui para o desenvolvimento do povoamento de *Eucalyptus grandis*, pois se verificou efeito de LE sobre a produção de biomassa dos eucaliptos. O aumento da biomassa seca total (lenho, casca, folha e galho) foi associado a doses de LE em combinação com adubos minerais NPK. A biomassa de tronco correspondeu a 85% da biomassa total (lenho, casca, folha, galho) para as diferentes doses de lodo, assim, acréscimos de biomassa total beneficiam esse compartimento arbóreo.

O volume de madeira, com casca ou sem casca, de eucalipto refletiu efeito da aplicação de LE e do adubo mineral fosfatado. A elevação da produção de madeira com casca foi relacionada em função das doses de LE e de adubo mineral fosfatado em combinação com adubos minerais nitrogenado e potássico.

A viabilidade econômica da maioria dos tratamentos foi constatada tanto para o cenário no qual o produtor florestal é isento do custo de transporte do LE quanto para aquele no qual ele arca com todo este custo para as condições do experimento e local. Isto ocorreu, pois os valores de produção de madeira com casca de eucalipto foram diretamente relacionadas às doses de LE e de adubo mineral fosfatado utilizadas no delineamento deste estudo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico 2013**: ano base 2012. Disponível em: <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf.>. Acesso em: 22 ago. 2014.

ABREU JUNIOR, C. H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p. 337-343, 2003.

ABREU JUNIOR, C. H.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J. C. Uso agrícola de resíduos orgânicos: propriedades químicas do solo e produção vegetal. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, p. 391-479, 2005.

ABREU JUNIOR, C. H.; NOGUEIRA, T. A. R.; OLIVEIRA, F. C.; PIRES, A. M. M.; FRANCO, A. Aproveitamento agrícola de resíduos no canavial. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; NOGUEIRA, T. A. R.; TASSO JÚNIOR, L. C.; NOGUEIRA, G. A.; BERNARDI, J. H. (Org.). **Tecnologia na agroindústria canavieira**. Jaboticabal: FUNEP, 2008, p. 183-210.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURA ENGINEERS – ASAE. **D 497.4, Agricultural machinery management data**. Michigan: ASAE Standards, 1998.

ANDRADE, C. A.; MATTIAZZO, M. E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biossólido (lodo de esgoto) em plantas florestais de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis,** Piracicaba, v. 58, p. 59-72, 2000.

ANDRADE, C. A.; OLIVEIRA, C.; CERRI, C. C. Qualidade da matéria orgânica e estoques de carbono e nitrogênio em latossolo tratado com biossólido e cultivado com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 803-816, 2005.

BERTON, S. R.; NOGUEIRA, T. A. R. Uso de lodo de esgoto na agricultura (sewage sludge usage in agriculture). In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. (Org.) **Uso agrícola de lodo de esgoto –** Avaliação após a resolução n° 375 do CONAMA. 1. Ed. Botucatu: FEPAF, 2010. p. 31-50.

BRASIL. Lei nº 9.605, 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm>. Acesso em: 10 fev. 2014.

_____. Lei nº 11.445, 05 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de setembro de 1999, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8987, de 13 de fevereiro de 1995, revoga a lei nº 6.528, de 11 de maio 1978; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em: 10 fev. 2014.

_____. Lei nº 12.305, 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 05 fev. 2014.

CARDOSO, E. J. B. N.; NETO, P. F. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais: III. Alterações microbianas no solo. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. cap. 10, p. 197-202.

CASADO-VELA, J.; SELLÉS, S.; NAVARRO, J.; BUSTAMANTE, M. A.; MATAJAX, J.; GUERRIERO, C.; GOMES, I. Evaluation of composted sewage sludge as nutrional source for horticultural soils. **Waste Management**, Amsterdam, v. 26, p. 946-952, 2006.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA. **Informativo CEPEA – Setor Florestal**. Piracicaba, n. 133-144, 144 p., jan.- dez. 2013.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Decisão de diretoria Nº195-2005- E, de 23 de novembro de 2005.** Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução 375**: Uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados: critérios para projeto e operação. Brasília, DF, 2006. 31 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução 357:** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 2005. 27 p.

CONTADOR, C. **Projetos sociais**: avaliação e prática: impacto ambiental, externalidades, benefícios e custos sociais. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008. cap. 2, p. 37-54.

CORRÊA, R. S.; CORRÊA, A. S. Valoração de biossólidos como fertilizantes e condicionadores de solos. **SANARE**, Curitiba, v. 16, n. 16, 2001. Disponível em: <http://www.sanepar.com.br/sanepar/sanare/v16/CONDICIONADORES.htm >. Acesso em: 12 jun. 2014.

DUNN, J. A. **Reclamation using biosolids**: a primer on economics and other concerns. 2000. Denver: Rocky Mountain Water Environment Association, 2000. Disponível em: <http://www.rmwea.org/tech_papers/mine_forest_land_2000/Dunn.pdf >. Acesso em: 15 de jan. 2015.

EGAN, M. Biosolids management strategies: a evaluation of energy prodution as an alternative to land application. **Environmental Science and Pollution Research International**, Landsberg, v. 20, p. 4299-4310, 2013.

FARIA, L. C. de; RODRIGUEZ, L. C. E. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais: V. Avaliação do potencial de uso do resíduo da ETE de Barueri, SP. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. cap. 12, p. 209-213.

FARIA, L. C. **Uso do lodo de esgoto (biossólido) como fertilizante em eucaliptos:** demanda potencial, produção e crescimento das árvores e viabilidade econômica. 2007. 105 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FERNANDES, F. Estabilização e higienização de biossólidos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. cap. 3, p. 45-67.

FERNANDES, S. A. P.; BETTIOL, W; CERRI, C. C. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 30, p. 65-77, 2005.

FERRAZ, A. V. **Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade e na ciclagem de nutrientes em plantios de *Eucalyptus grandis* e no cultivo de plantas alimentícias (simulando alterações do uso agrícola do solo)**. 2013. 159 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

FIRME, L. P. **Produção de madeira e elementos potencialmente tóxicos no sistema solo-eucalipto tratado com lodo de esgoto**. 2009. 81 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; COSTA, L. M.; NEVES, J. C. L. Efeito do método de preparo do solo, em área de reforma, nas suas características, na composição mineral e na produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 635-646, 2003.

GAVA, J. L.; OLIVEIRA, F. C. A experiência da Suzano Papel e Celulose com o uso do biossólido em plantios de eucalipto. In: SIMPÓSIO SOBRE O USO DO BIOSSÓLIDO EM PLANTAÇÕES FLORESTAIS, 2006, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 2006. Disponível em: http://www.ipef.br/eventos/2006/biossolidos/Simposio_Biossolidos_07.pdf. Acesso em: 11 jan. 2014.

GONÇAVES, J. L. M. **Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas**. 1994. 84 p. Tese (Livre Docência em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

GONÇALVES, J. L. M.; RAIJ, B. van; GONÇALVES, J. C. Florestais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** 2. ed. Campinas: Instituto Agromômico; Fundação IAC, 1997. p. 245-260. (Boletim Técnico, 100).

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 1-57.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; LACLAU, J. P.; SMETHURST, P.; GAVA, J. L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 45-61, 2004.

GONZALEZ, R.; TREASURE, T.; WRIGHT, J.; SALONI, D.; PHILLIPS, R.; ABT, R.; JAMEEL, H. Exploring the potential of Eucalyptus for energy production in the Southern United States: Financial analysis of delivered biomass. Part I. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 35, p. 755-766, 2011.

GOVEN, J.; LANGER, E. R.L. The potential of public engagement in sustainable waste management: designing the future for biosolids in New Zealand. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 90, p. 921-930, 2009.

GRAÇA, L. R.; RODIGHERI, H. R.; CONTO, A. J. **Custos florestais de produção:** conceituação e aplicação. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 32 p. (Documentos, 50).

GUEDES, M. C. **Efeito do lodo de esgoto (biossólido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de subbosque, em plantação de eucalipto**. 2000. 74 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

GUEDES, M. C. **Ciclagem de nutrientes após aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre Latossolo cultivado com *Eucalytus grandis***. 2005. 154f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

GUEDES, M. C.; POGGIANI, F. Variação dos teores de nutrientes foliares em eucalipto fertilizado com biossólido. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 188-201, 2003.

GUEDES, M. C.; ANDRARE, 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**, Viçosa, v. 30, p. 267-280, 2006.

HAYASHI, K.; ABDOULAYE, T.; WAKATSUKI, T. Evaluation of the utilization of heated sewage sludge for peri-urban horticulture production in the Sahel of West Africa. **Agricultural System**, Amsterdam, v. 103, p. 36-40, 2010.

HENRY, C. L.; COLE, D. W. Use of biosolids in the Forest: technology, economics and regulations. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 13, n. 45, p. 269-217, 1997.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA – IEA. **Levantamento de salários rurais e pagamento de empreita**. São Paulo, 2014. Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br/nia1/Precor_Sistema_Sobre.aspx?cod_sis=13>. Acesso em: 25 ago. 2014.

KIMBERLEY, M. O.; WANG, H.; WILKS, P. J.; FISHER, C. R.; MAGESAN, G. N. Economic analysis of growth response from a pine plantation forest applied with biosolids. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 189, p. 345-351, 2004.

KVARNSTROM, E.; M. NILSSON. Reusing phosphorus: engineering possibilities and economic realties. **Journal of Economic Issues**, Sacramento, v. 33, n. 2, p. 393-341, 1999.

LIMA JÚNIOR, V. B.; REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. Determinação da taxa de desconto a ser usada na análise econômica de projetos florestais. **Revista Cerne,** Lavras**,** v. 3, n. 1, p. 45-66, 1997.

LIRA, A. C. S. de. **Lodo de esgoto em plantações de eucalipto:carbono, nitrogênio e aspectos da fotossíntese.** 2006. 126 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

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

LUCAS, E. F.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; CHITOLINA, J. C. Eficiência de absorção e utilização de fósforo (^{32}P) por mudas de eucalipto e arroz. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 3, p. 543-547, 2002.

LUNDIN, M.; OLOFSSON, M.; PETTERSSON, G. J.; ZETTERLUND, H. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. **Resource, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 41, p. 255-278, 2004.

MALDONADO, C. A. B. **Fertilidade do solo, nutrição e crescimento de plantas de eucalipto ao longo de 46 meses após aplicação de lodo de esgoto**. 2009. 113 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MARCONATO, R. **Análise do custo de transporte de fertilizantes com uso de modelagem digital de terreno.** 2012. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MATSUNGA, M.; BEMELMANS, P. F.; TOLEDO, P. E. N. de; DULLEY, R. D.; OKAWA, H.; PEDROSO, I. A. Metodologia do custo de produção utilizada pelo IEA. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 123-139, 1976.

MATTIAZO, M. E. **Comportamento de cobre, cádmio, crômio, níquel e zinco adicionados a solos de clima tropical em diferentes valores de pH**. 1994. 197 f. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

MATTIAZZO, M. E.; ANDRADE, C. A. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais: IV. Lixiviação de N inorgânico e toxicidade de metais pesados. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. cap. 11, p. 203-208.

MCNAB, W. H.; BERY, C. R. Distribution of aboveground in three pine species planted on a devasted site amended with sewage sludge or inorganic fertilizer. **Forest Science**, Washington, DC, v. 31, n. 2, p. 373-382, 1985.

MCDEVITT, J. E.; LANGER, E. R.; LECKIE, A. C. Community engagement and environmental life cycle assessment of Kaikoura´s biosolid reuse options. **Sustainability**, Basel, v. 5, p. 242-255, 2013.

MELO, W .J.; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. cap. 5, p. 109-142.

MIEHLE, P.; LIVESLEY S. J.; FEIKEMAB, P. M.; LIC, C.; ARNDT, S. K. Assessing productivity and carbon sequestration capacity of *Eucalyptus globulus* plantations using the process model Forest-DNDC: Calibration and validation. Ecological Modelling, Amsterdam, v. 192, p. 83-94, 2006.

MILARÉ, E. **Direito do ambiente**: a gestão ambiental em foco. 5. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2007.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000.

NOGUEIRA, T. A. R.; FRANCO, A.; HE, Z.; BRAGA, V. S.; FIRME, L. P.; ABREU-JUNIOR, C. H. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 114, p. 168–177, 2013.

NORONHA, J. F. **Projetos agropecuários**. Piracicaba: FEALQ, 1981.

OSAKI, M. **Gestão financeira e econômica da propriedade rural com multiproduto**. 2012. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

PHILIPPI JUNIOR, A.; ROMÉRO, M. A.; BRUNA, G. C. **Curso de Gestão Ambiental**. 1. ed. Barueri: Manole, 2004. v. 1, 1045p.

PIRES, A. M. M.; MATTIAZZO, M. E. **Avaliação da viabilidade do uso de resíduo na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008. 9 p. (Circular Técnica, 19).

PLANO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO - PLANSAB. Brasília, DF, 2013. Disponível em: <www.cidades.gov.br/index.php/plano-nacional-de-saneamento-basico-plansab>. Acesso em: 18 fev. 2013.

POGGIANI, F.; GUEDES, M.C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. cap. 8, p. 163-178.

POGGIANI, F.; SILVA, P. H. M. Biossólido aumenta produtividade de eucaliptos. **Visão Agrícola**, Piracicaba, n. 4, p. 105-107, 2005.

PRESCOTT, C. E.; BROWN, S. M. Five-year growth response of western red cedar, western hemlock, and amabilis fir to chemical and organic fertilizers. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 28, p. 1328-1334, 1998.

PROSSER, R. S.; LISSEMORE, L.; SOLOMON, K. R.; SIBLEY, P. K. Toxicity of biosolids-derived triclosan and triclocarban to six crop species. **Environmental Toxicology and Chemistry**, New York, v. 33, p. 1840-1848, 2014.

PULITO, A. P. **Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus***. 2009. 58 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

PYCKE , B. F. G.; ROLL, I. B.; BROWNAWELL, B. J.; KINNEY, C. A.; FURLONG, E. T.; KOLPIN, D. W.; HALDEN, R. U. Transformation products and human metabolites of triclocarban in sewage sludge across the United States. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 48, p. 7881-7890, 2014.

QUINTANA, N. R. G.; CARMO, M. S.; MELO, W. J. Viabilidade Econômica do uso de lodo de esgoto na agricultura, estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 39, n. 6, p. 31-36, 2009.

QUINTANA, N. R. G.; BUENO, O. C.; MELO, W. J. Custo de transporte do lodo de esgoto para viabilidade no uso agrícola. Revista Energia na Agricultura. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Botucatu, v. 27, n. 3, p. 90-96, 2012.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agromômico; Fundação IAC, 1997. p. 245-260. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

RAMLAL, E.; YEMSHANOV, D.; FOX, G.; MCKENNEY, D. A bioeconomic model of afforestation in Southern Ontario: Integration of fiber, carbon and municipal biosolids values. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 90, p. 1833–1843, 2009.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. cap. 4, p. 166-233.

RIBEIRINHO, V. S.; MELO, W. J.; SILVA, D. H.; FIGUEIREDO, L. A.; MELO, G. M. P. Fertilidade do solo, estado nutricional e produtividade de girassol, em função da aplicação de lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n.2, p. 166-173, 2012.

RIEKERK, H. **Waste utilization in forest lands of Florida**. Gainesville: Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 2000. (Circular, 734). Disponível em: <http://ufdcimages.uflib.ufl.edu/IR/00/00/18/17/00001/FR02800.PDF>. Acesso em: 11 out. 2014.

ROCHA, G. N.; GONÇALVES, J. L. M.; MOURA, I. M. Mudanças na fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 623-639, 2004.

SAFOU-MATONDO, R.; DELEPORTE, P.; LACLAU, J. P.; BOUILLET, J. P. Hybrid and clonal and variability of nutrient content and nutrient use efficiency in Eucalyptus stands in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 210, p. 193-204, 2005.

SANCHES, A.; NOGUEIRA, I. R.; PERECIN, D. Ponto de sela e níveis ótimos de nutrientes em experimentos de adubação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 24, n. 8, p. 1003-1012, 1989.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 65-70, 2003.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F. de; NEVES, J. C. L. Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, p. 155-169, 1999.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Coordenadoria de Assistência Técnica Integral. Instituto de Economia Agrícola. **Levantamento censitário de unidades de produção agrícola do Estado de São Paulo** - LUPA 2007/2008. São Paulo: SAA/CATI/IEA, 2008. Disponível em: <http://www.cati.sp.gov.br/projetolupa>. Acesso em: 15 jun. 2014.

SETTE JUNIOR, C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; LOUSADA, J. L.; LACLAU, J. P. Efeito da aplicação de fertilização nitrogenada e lodo de esgoto nas características da madeira juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 3, p. 303-312, 2009.

SETTE JUNIOR, C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; LOUSADA, J. L.; LACLAU, J. P. Sazonalidade do incremento em diâmetro do tronco de árvores de Eucalyptus grandis pelo uso de dendrômetros. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 763-775, 2012.

SILVA, J. E. da; LEMAINSKI, J. Utilização do biossólido da CAESB na produção de milho no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 741-750, 2006a.

SILVA, J. E. da; LEMAINSKI, J. Avaliação agronômica e econômica da aplicação de biossólido na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 10, p. 1477-1484, 2006b.

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

SILVA, P. H.; 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, 2008a.

SILVA, P. H.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com lodos de esgoto úmido e seco. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 845-854, 2008b.

SILVA, R. M. L. da. **Resposta à fertilização de plantios comerciais de Eucalyptus e sua correlação com as características edafoclimáticas e silviculturais em diferentes regiões do estado de São Paulo.** 2011. 118 f. Dissertação (Silvicultura e Manejo Florestal) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SILVEIRA, M. L. A.; ALLEONI, L. R. F.; GUILHERME, L. R. G. Biosolids and heavy metal in soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 793-806, 2003.

SILVEIRA, R. L. V. A.; GAVA, J. L. Nutrição e adubação fosfatada em eucalipto. In: TSUIOSHI, Y.; SILVA, R. S. A. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. cap. 19, p. 495-536.

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, DF, v. 38, n. 10, p. 1187-1195, 2003.

SINGH, R. P.; AGRAWAL, M. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. **Waste Management**, Amsterdam, v. 28, p. 347–358, 2007.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 533-539, 2002.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análise de investimentos**: fundamentos, técnicas e aplicações. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2004. cap. 5, p. 69-109.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 17-31, 2004.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; JACOB, W.S.; TAKAHASHI, E. N. A twin-plot approach to determinate nutrient limitation and potential productivity in Eucalyptus plantation as landscapes scales in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 223, p. 358-362, 2006.

SU, J.; WANG, H.; KIMBERLEY, M. O.; BEECROFT, K.; MAGESAN, G. N.; HU, C. Fractionation and mobility of phosphorus in a sandy forest soil amended with biosolids. **Environmental Science and Pollution Research International**, Landsberg, v. 14, p. 529-535, 2007.

SU, J.; WANG, H.; KIMBERLEY, M. O.; BEECROFT, K.; MAGESAN, G. N.; HU, C. X. Distribution of heavy metals in a sandy forest soil repeatedly amended with biosolids. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 46, p. 502-508, 2008.

SUBEDI, B.; LEE, S.; MOON, H. B.; KANNAN, K. Emission of artificial sweeteners, select pharmaceuticals, and personal care products through sewage sludge from wastewater treatment plants in Korea. **Environmental International**, Oxford, v. 68, p. 33-40, 2014.

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

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos In: TSUTIYA, M. T. (Ed.). **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. cap. 5, p. 133-180.

TURNER, J.; LAMBERT, M. J.; HUMPHREYS, F. R. Continuing growth response to phosphate fertilizers by a *Pinus radiate* platation over fifty years. **Forest Science**, Washington, DC, v. 48, p. 556-568, 2002.

UNITED ESTATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **SW-846 Manual** Washington, DC, 2009. Disponível em: <http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/sw846.htm>. Acesso em: 21 jul. 2014.

UNITED ESTATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Biosolids generation, use, and disposal in the United States**. Washington, DC, 1999. 81 p. Disponível em:<http://www.epa.gov/composting/pubs/biosolid.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2014.

VAZ, L. M. S.; GONÇALVES, J. L. M. Uso de biossólidos em povoamento de *Eucalyptus grandis*: efeito em atributos químicos do solo, no crescimento, e na absorção de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 747-758, 2002.

VEIGA, R. A. A. **Dendrometria e inventário florestal.** Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 1984. 108 p. (Boletim Didático, 1).

WANG, H. L.; KIMBERLEY, M. O.; SCHLEGELMILCH, M. Biosolids-derived nitrogen mineralization and transformation in forest soil. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 32, p. 1851-1856, 2003.

WANG, H.; KIMBERLEY, M. O.; MAGESAN, G. N.; MCKINLEY, R. B.; LEE, J. R.; LAVERY, J. M.; HODGKISS, P. D. F.; PAYN, T. W.; WILKS, P. J.; FISHER, C. R.; MCCONCHIE, D. L. Midrotation effects of biosolids application on tree growth and wood properties in a Pinus radiata plantation. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 36, n. 8, p. 1921-1930, 2006.

WANG, H. L.; BROWN, S. L.; MAGESAN, G. N.; SLADE, A. H.; QUINTERN, M.; CLINTON, P. W.; PAYN, T. W. Technological options for the management of biosolids. **Environmental Science and Pollution Research International**, Landsberg, v. 15, p. 308-317, 2008.

WANG, H. L.; KIMBERLEY, M. O; WILKS, P. J. Economic analysis of a pine plantation receiving repeated applications of biosolids. **Plos One**, San Francisco, v.8 , p.1-6, 2013.

WEETMAN, G. F.; MCDONALD, M. A.; PRESCOTT, C. E.; KIMMINS, J. P. Response of western hemlock, Pacific silver fir, and western red cedar plantation on northern Vancouver Island to applications of sewage sludge and inorganic fertilizer. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 23, p. 1815-1820, 1993.

XU, D.; DELL, B.; MALAJCZUK, N.; GONG, M. Effects of P fertilisation on productivity and nutrient accumulation in a *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* plantation in southern China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 161, p. 89-100, 2002.

XUAN, R. C.; BLASSENGALE, A. A.; WANG, Q. Q. Degradation of estrogenic hormones in a silt loam soil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 56, p. 9152-9158, 2008.

ZHU, B.; ALVA, A. K. Trace metal and cation transport in a sandy soil with various amendments. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 57, n. 3, p. 723-727, 1993.

ZHU, J. Y.; PAN, X. J. Woody biomass pretreatment for cellulosic ethanol production: Technology and energy consumption evaluation. **Bioresource Technology**, Essex, v. 101, p. 4992-5002, 2010.