

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

TESE

RECICLAGEM AGRÍCOLA E FLORESTAL DE LODO DE
ESGOTO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

ALAN HENRIQUE MARQUES DE ABREU

2017



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

RECICLAGEM AGRÍCOLA E FLORESTAL DE LODO DE
ESGOTO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

ALAN HENRIQUE MARQUES DE ABREU

Sob a Orientação do Professor

Paulo Sérgio dos Santos Leles

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciências**, no Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de concentração de Silvicultura e Manejo Florestal.

Seropédica, RJ

Outubro de 2017

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A162r Abreu, Alan Henrique Marques de , 1989-
Reciclagem Agrícola e Florestal de Lodo de Esgoto
no Estado do Rio de Janeiro / Alan Henrique Marques
de Abreu. - Santo André, 2017.
82 f.: il.

Orientador: Paulo Sérgio dos Santos Leles.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio
de Janeiro, Programa de Pós Graduação em Ciências
Ambientais e Florestais, 2017.

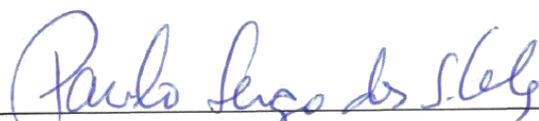
1. biossólido. 2. resíduos sólidos . 3.
fertilizantes. 4. zoneamento ambiental. 5. valoração
de resíduos. I. Leles, Paulo Sérgio dos Santos , 1966
, orient. II Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Programa de Pós Graduação em Ciências
Ambientais e Florestais III. Título.

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

ALAN HENRIQUE MARQUES DE ABREU

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

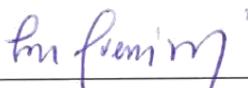
TESE APROVADA EM 04/10/2017



Paulo Sérgio dos Santos Leles / Prof. Dr. UFRRJ (Orientador)



Cláudia Pozzi Jantalia / Pesq.^a Dr.^a EMBRAPA



Iraê Amaral Guerrini / Prof. Dr. UNESP – Botucatu



Vanessa Maria Basso / Prof.^a Dr.^a UFRRJ



Rafael Coll Delgado / Prof. Dr. UFRRJ

*Dedico a todos os professores que contribuíram
para minha formação até aqui...*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por estar sempre presente ao longo da minha vida, sem ele nada seria possível.

Agradeço a minha família que mesmo à distância, sempre esteve presente e incentivou meu interesse na busca por conhecimento. Agradeço em especial minha esposa Diana que me acompanhou e me deu forças nesta jornada e minha filha Maria Julia, que nasceu durante o doutorado e trouxe mais alegria para os meus dias.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pela importância na minha formação pessoal e profissional ao longo dos 10 anos, desde o ingresso na Instituição.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, ao qual pude acompanhar seu crescimento e evolução nos últimos anos, pela oportunidade de cursar o doutorado.

Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE) que sempre apoiou o desenvolvimento das pesquisas com lodo de esgoto e hoje aplica na prática os resultados da mesma. Aos companheiros de trabalho e acima de tudo amigos, Alcione Duarte, Guto Gesteira, Elton Abel, Adriano Gama, Cesar Seleri, Márcia Pieroni, Zana, Rose, Fátima, Hamilton, Walcimar, Antônio Calvão, Kléber, Marcelo, Carlos, Pepeu, Tuninho e demais funcionários da CEDAE, que fazem do dia a dia na Casa 7, muito mais agradáveis e produtivos.

Aos meus amigos, Pedro, Alysson, Ricardo, Elton, Gilsonley, Weverton, Jorge, aos amigos do doutorado, e aos acumulados durante a caminhada, pela amizade, força e companheirismo demonstrados. Sem eles a caminhada seria muito mais árdua.

Um agradecimento especial aos amigos Elton, Jorge e Adriano. As incontáveis horas de conversas e debates foram essenciais para realização deste trabalho.

Agradeço ao amigo e professor Paulo Sérgio, pela orientação, amizade e por transmitir sua experiência e sabedoria através de seus valiosos ensinamentos que serão lembrados pelo resto da vida.

Aos Professores Lucas Amaral, Guilherme Chaer, Alexander Silva, Rafael Delgado, Arthur Júnior, Eduardo Silva, Vanessa Basso, Robson Amâncio, Márcio Francelino e Bruno Mendonça, que ao longo desta caminhada contribuíram de alguma forma na concepção e amadurecimento das ideias apresentadas nesta Tese.

Aos membros da banca por aceitar contribuir com este trabalho através da participação na banca, correções e sugestões.

A toda a equipe do LAPER, inclusive os que já se formaram, pelos ensinamentos adquiridos.

RESUMO

ABREU, Alan Henrique Marques de. **Reciclagem agrícola e florestal de lodo de esgoto no estado do Rio de Janeiro**. 2017. 82 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

O lodo de esgoto é o resíduo gerado no processo de tratamento esgotos, rico em matéria orgânica e nutrientes, e que se devidamente tratado e higienizado pode ser aproveitado benéficamente em áreas agrícolas e florestais. Para a disposição agrícola florestal, o lodo de esgoto deve estar estabilizado (biossólido), e atender aos parâmetros estipulados pela Resolução CONAMA nº 375/2006. O presente trabalho tem como objetivo analisar as perspectivas de reciclagem agrícola e florestal do lodo gerado nas estações de tratamento de esgotos da região metropolitana do Rio de Janeiro. Buscou-se conhecer química e biologicamente o lodo de esgoto, valorar economicamente este resíduo, analisar as perspectivas de reciclagem com base nas atividades agrícolas e florestais do estado, além de identificar com base nas restrições legais e ambientais as áreas aptas a aplicação de lodo de esgoto no solo, no estado do Rio de Janeiro. Os oito lotes de lodo analisados apresentaram teores relativamente elevados de nutrientes e de matéria orgânica, e enquadraram-se nos parâmetros de metais pesados, agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos estipulados pela resolução CONAMA nº 375/2006, com atributos favoráveis para a reciclagem agrícola e florestal. O panorama agrícola do estado do Rio de Janeiro se mostra favorável para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto, visto que existe uma grande demanda potencial e dentre as dez culturas agrícolas com maior área plantada no estado, em oito pode-se utilizar o biossólido como fertilizante ou condicionador de solos. Os biossólidos apresentaram elevado valor agregado com base no potencial fertilizador. O alto valor de mercado de substratos orgânicos e condicionadores de solo, demonstram que este também pode ser um mercado a ser preenchido pelo biossólido. As áreas do estado do Rio de Janeiro que podem receber aplicação de biossólido no solo, somam 1.270.740 ha, totalizando 32,25% da área do estado. Os resultados deste trabalho reforçam a necessidade de encontrar métodos de disposição mais sustentáveis para este resíduo, que pode beneficiar tanto produtores rurais, que podem minimizar seus custos de produção, como os geradores de lodo, que passam a dispor seus resíduos de forma mais sustentável.

Palavras chave: biossólido, resíduos sólidos e fertilizantes.

ABSTRACT

ABREU, Alan Henrique Marques de. **Agricultural and forestry recycling of sewage sludge in the Rio de Janeiro state**. 2017. 82p. Thesis (Ph Science in Environmental and Forestry Sciences) Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

Sewage sludge is the waste generated in the sewage treatment process, rich in organic matter and nutrients, and if properly treated and sanitized can be used beneficially in agricultural and forest areas. For agricultural and forestry use, sewage sludge must be stabilized (biosolid), and comply with the parameters stipulated by CONAMA Resolution nº 375/2006. The present work aims to analyze the prospects of agricultural and forestry recycling of the sludge generated in the sewage treatment plants of the state of Rio de Janeiro. It was sought to know chemically and biologically the sewage sludge produced in the metropolitan region of Rio de Janeiro, to economically evaluate this waste, to analyze the prospects of recycling based on the state's agricultural and forestry activities, and to identify based on legal and environmental restrictions the areas suitable for the application of sewage sludge in the soil, in the state of Rio de Janeiro. The eight batches of sludge analyzed were high in nutrients and organic matter, and were included in the parameters of heavy metals, pathogens and bacteriological indicators stipulated by CONAMA Resolution nº 375/2006, with favorable attributes for agricultural and forestry recycling. The agricultural panorama of the state of Rio de Janeiro is favorable for the agricultural recycling of sewage sludge, since there is a great potential demand and among the ten agricultural crops with the largest planted area in the state, in eight the sludge can be used as fertilizer or soil conditioner. The sludge presented high added value based on the potential fertilizer. The high market value of organic substrates and soil conditioners demonstrate that this can also be a market to be filled by sewage sludge. The areas of the state of Rio de Janeiro that can receive application of sewage sludge in the soil, total 1,270,740 ha, totaling 32.25% of the area of the state. The results of this work reinforce the need to find more sustainable disposal methods for this waste, which can benefit both rural producers, who can minimize their production costs, such as sludge generators, who dispose of their waste in a more sustainable way.

Key words: biosolid, solid waste and fertilizer

Sumário

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. OBJETIVO	1
2.1. Objetivos Específicos	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1. Lodo de esgoto	2
3.2. Produção de lodo de esgoto	3
3.3. Disposição Final.....	4
3.4. Reciclagem Agrícola.....	6
3.5. Reciclagem Florestal.....	8
3.6. Valoração de lodo de esgoto	10
3.7. Segurança Ambiental	11
3.8. Áreas de aplicação de lodo de esgoto	11
4. REFERÊNCIAS	12
CAPÍTULO I	22
RESUMO.....	23
ABSTRACT.....	24
1. INTRODUÇÃO.....	25
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4. CONCLUSÃO.....	35
5. AGRADECIMENTOS	35
6. REFERÊNCIAS	35
CAPÍTULO II	41
RESUMO.....	42
ABSTRACT.....	43
1. INTRODUÇÃO.....	44
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	44
2.1. Valoração com base no potencial fertilizador.....	44
2.2. Distância viável de transportes	46
2.2.1. Distância máxima eficiente de transporte subsidiado pela ETE geradora	47
2.2.2. Distância máxima eficiente de transporte subsidiado pelo produtor rural	47
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
3.1. Valoração com base no potencial fertilizador.....	48
3.2. Distância viável de transportes	53
3.2.1. Distância máxima eficiente de transporte subsidiado pela ETE geradora	53
3.2.2. Distância máxima eficiente de transporte subsidiado pelo produtor rural	55
4. CONCLUSÃO.....	56
5. REFERÊNCIAS	56
CAPÍTULO III	60
RESUMO.....	61

ABSTRACT.....	62
1. INTRODUÇÃO.....	63
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	64
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4. CONCLUSÃO.....	71
5. REFERÊNCIAS	72
1. CONCLUSÃO GERAL	75
ANEXO I.....	76
ANEXO II	80

1. INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda da sociedade pelas melhorias das condições ambientais e humanas tem exigido grandes investimentos em políticas públicas que compatibilizem o crescimento populacional com a preservação do meio ambiente. Neste contexto, as Estações de tratamento de esgoto (ETEs) possuem papel fundamental, coletando resíduos domiciliares e industriais potencialmente nocivos à saúde humana, tratando-os, e desta forma evitando todos os dias que uma parcela substancial de poluentes chegue aos corpos hídricos (BETTIOL e CAMARGO, 2006).

No processo de tratamento de esgoto, mais de 99% do material recebido nas ETEs é composto por água, que após o devido tratamento é novamente devolvida aos mananciais. O resíduo deste processo trata-se de um material denominado lodo de esgoto, que apesar de ser rico em matéria orgânica e nutrientes, sem o devido tratamento e destinação final pode oferecer riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Desta forma, torna-se necessário o desenvolvimento de alternativas de destinação factíveis e sustentáveis para que esse resíduo não se transforme em um passivo ambiental.

Cada país ou região define as estratégias de reciclagem do lodo de esgoto dependendo das suas necessidades ou vocações, que podem incluir desde a geração de energia (REN et al., 2017), produção de combustíveis, cimento e agregados leves (MENDOZA et al., 2010; WERLE e WILK, 2010; MATSUMIYA, 2014), recuperação de nutrientes escassos e finitos como o fósforo (TORRI et al., 2017; EGGLE et al., 2015), recuperação de metais raros (WESTERHOFF et al., 2015), utilização como condicionador de solos e fertilizante em cultivos agrícolas, florestais e recuperação de áreas degradadas (SAMPAIO et al., 2012; CIESLIK et al., 2015; MARRON et al., 2015; SAMPAIO et al., 2016; ABREU et al., 2017b; GUERRINI et al., 2017), até como substrato para produção de mudas florestais e ornamentais (TRAZZI et al., 2014; ABREU et al., 2017a; CABREIRA et al., 2017).

A reciclagem agrícola e florestal do lodo de esgoto pode ser uma alternativa mais sustentável de disposição deste resíduo, pois fecha o ciclo dos nutrientes entre o campo e a cidade, podendo trazer vantagens tanto para os geradores de lodo, como para produtores rurais. A reciclagem passa obrigatoriamente pela caracterização deste material, para conhecimento das suas qualidades e riscos e verificar se o mesmo atende a resolução CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006), legislação que estipula os parâmetros aceitáveis de lodos para aplicação deste resíduo no solo. Além disso, é importante conhecer o valor agregado em nutrientes e matéria orgânica no lodo de esgoto, pois, contribui para sensibilizar tanto os geradores de lodo, quanto os recebedores, sobre a importância e a necessidade de reciclagem deste material.

Apesar dos benefícios técnicos e ambientais comprovados através dos estudos científicos, a análise estratégica da reciclagem de lodo de esgoto ainda é bastante incipiente. Tendo em vista o cenário atual favorável às práticas de reciclagem de resíduos, que enquadram além da necessidade de insumos mais baratos, a pressão da legislação por mecanismos mais limpos, a análise estratégica das perspectivas de reciclagem de lodo de esgoto com base em fatores de ordem econômica, social, ambiental e legal é uma medida que se impõe com urgência.

2. OBJETIVO

Analisar as perspectivas da reciclagem agrícola e florestal do biossólido produzidos pelas estações de tratamento de esgotos (ETE) da região metropolitana do Rio de Janeiro.

2.1. Objetivos Específicos

- Caracterizar química e biologicamente os biossólido produzidos pelas ETE's da região metropolitana do Rio de Janeiro e analisar as perspectivas de reciclagem;

- Valorar economicamente biossólido produzidos pelas ETE's da região metropolitana do Rio de Janeiro e analisar a viabilidade logística da reciclagem;
- Mapear e analisar a aptidão de terras do Estado do Rio de Janeiro para a reciclagem agrícola e florestal do biossólido produzido pelas ETE's da região metropolitana do Rio de Janeiro.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. LODO DE ESGOTO

As estações de tratamento de esgotos (ETEs) prestam importante serviço ambiental à sociedade, coletando e tratando diariamente milhões de litros de esgoto e desta forma, evitando que considerável carga orgânica chegue aos corpos hídricos. Além de ser uma questão de saúde pública, o tratamento de esgotos é uma medida de preservação ambiental e consiste, genericamente, num conjunto de processos físicos, químicos e biológicos que resultam na remoção da matéria orgânica e dos sólidos sedimentáveis (PEREIRA et al., 2013).

Após o devido tratamento, a água é devolvida aos mananciais, restando nas estações a parte sólida, que pode ser dividida em três tipos de resíduos sólidos, os resíduos grosseiros contidos pelo gradeamento, a areia e o lodo de esgoto. O lodo de esgoto é o resíduo gerado em maior volume e é tipicamente formado pela matéria particulada orgânica e inorgânica decantada durante o tratamento primário do esgoto (lodo primário) e microrganismos excedentes produzidos durante o processo de ativação biológica do esgoto no tratamento secundário (lodo secundário) (CHRISTODOULOU; STAMATELATOU, 2016).

O lodo de esgoto pode ser definido como o resíduo gerado no processo de tratamento de esgotos sanitários, composto por uma infinidade de microrganismos, compostos orgânicos e inorgânicos (BOURIOUG et al., 2015). Embora o lodo de esgoto represente menos de 1% da composição do esgoto líquido que entra nas Estações, são gerados milhões de toneladas de lodo todos os anos e os custos com sua disposição final podem representar de 40 a 60% dos custos de operação de uma ETE (GHAZY et al., 2009).

Para minimizar os custos relativos ao transporte deste resíduo até o local de disposição final, as estações geralmente possuem em suas estruturas as etapas de adensamento e desaguamento, que visam principalmente retirar água do material e conseqüentemente reduzir o volume do lodo, influenciando os custos de transporte e estocagem (LEMANSKI; SILVA, 2006; QUINTANA et al., 2012; PRITCHARD et al., 2015). Dependendo do grau de umidade, o lodo de esgoto pode apresentar diferentes formas, desde líquido (94 a 97% de umidade), pastoso (60 a 90%), sólido (20 a 40%), até na forma de grânulos ou *pellets*, quando atinge teores de umidade próximos de 10% (LU et al., 2012).

De forma geral, os lodos de esgoto possuem teores de N variando de 1,0 a 8%, P de 0,5 a 4%, K de 0.1 a 0.6% e teores de matéria orgânica de 30 a 60% (COSCIONE et al., 2014; CARVALHO et al., 2015; KOMINKO et al., 2017). Devido a sua composição rica em nutrientes e matéria orgânica, tem sido proposta a reciclagem agrícola e florestal deste material em detrimento a sua disposição em aterros sanitários (ABREU et al., 2017b). No entanto, para que o mesmo seja aplicado ao solo, deve estar devidamente estabilizado e higienizado e atender aos parâmetros da resolução CONAMA nº 375 / 2006 (BRASIL, 2006).

O processo de estabilização do lodo pode ser realizado através de digestão aeróbica ou anaeróbica e tem por finalidade reduzir a quantidade de patógenos, eliminar os maus odores e inibir, reduzir ou eliminar o potencial de putrefação, já a higienização busca garantir um nível de patogenicidade que, ao ser disposto no solo, o lodo não cause riscos à população nem ao meio ambiente (BRASIL, 2006). Os principais métodos utilizados para higienização de lodos destinados a reciclagem agrícola são a secagem térmica, solarização, compostagem,

vermicompostagem e caleação (NASCIMENTO et al., 2014). A escolha de um ou outro método de estabilização e higienização, depende principalmente da estrutura e tipo de tratamento adotado pela estação e a estratégia de destinação final.

Visando o uso agrícola, após transformações microbianas e devida higienização e estabilização, o lodo de esgoto pode passar a ser designado como biossólido, termo que surgiu nos Estados Unidos no início da década de 90 para diferenciar o lodo de esgoto estabilizado e higienizado do lodo de esgoto que não foi devidamente tratado (CHRISTODOULOU; STAMATELATOU, 2016). Esta denominação tem como objetivo tirar a conotação pejorativa associada ao termo lodo de esgoto, melhorar a aceitação pública e promover o conceito de que este material não é simplesmente um resíduo e que pode e deve ser reutilizado ou reciclado em sistemas de usos benéficos (GUEDES et al., 2006; LU et al., 2012). No entanto, diversas organizações e cientistas ainda preferem adotar o termo lodo de esgoto, mesmo para aqueles lodos devidamente tratados que são destinados a agricultura (CHRISTODOULOU; STAMATELATOU, 2016).

As características do lodo de esgoto dependem diretamente da origem do esgoto e da tecnologia empregada para o tratamento do mesmo (KOMINKO et al., 2017). Por exemplo, estações que recebem carga de esgotos industriais tendem a gerar lodos com maiores teores de metais pesados do que aquelas que tratam apenas esgotos de origem domiciliar (TIRUNEH et al., 2014). A presença de potenciais contaminantes que possam trazer riscos a saúde humana e ao meio ambiente deve ser observada para definir a destinação final segura para este resíduo.

Os principais riscos de contaminação referem-se aos metais pesados, tais como chumbo (Pb), níquel (Ni), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu) e zinco (Zn), organismos patogênicos (bactérias, protozoários, vírus etc.), além de uma gama de compostos orgânicos sintéticos (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, dioxinas, furanos, pesticidas, hormônios sintéticos e naturais etc) (YADA et al., 2014). Tais fatores foram alicerces para a resolução nº 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 2006), através da qual regulamenta e define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados.

3.2. PRODUÇÃO DE LODO DE ESGOTO

Embora a parte sólida represente menos de 1% da composição do esgoto líquido que entra nas estações, são gerados milhões de toneladas de lodo todos os anos e o custo de manejo e disposição deste resíduo pode representar de 40 a 60% do custo de operação de uma estação (GHAZY et al., 2009). Diante disto, a grande preocupação global com o lodo de esgoto refere-se à destinação final adequada, sem riscos a saúde humana e ao meio ambiente, do grande volume gerado todos os dias nas estações de tratamento de esgoto (BOURIOUG et al., 2015).

Na Europa, estima-se que sejam produzidas cerca de 10 milhões de toneladas de lodo de esgoto em base seca anualmente, sendo as principais formas de destinação final a reciclagem agrícola, incineração, compostagem e o descarte em aterros sanitários (MININNI et al., 2015). Já nos Estados Unidos, são produzidos anualmente aproximadamente 8 M t ano⁻¹ de lodo de esgoto, com 55% deste total sendo destinado na agricultura (Le BLANC et al., 2008). Na China, estima-se uma produção anual de 11.2 M t ano⁻¹ e as principais destinações são para agricultura, compostagem, incineração e geração de energia (SUANON et al., 2016; REN et al., 2017).

No Brasil, estimativas do começo do século apontavam para produção de lodo de esgoto na ordem de 150.000 t⁻¹ano (MACHADO, 2001). No entanto, a democratização do acesso à coleta e tratamento de esgotos promovidos nas últimas décadas por programas governamentais, fez com que essas estimativas fossem aumentando gradativamente. Andreolli

et al. (2008), com base em dados do SNIS (2005), estimaram a produção de lodo de esgoto no Brasil em aproximadamente 362.000 t⁻¹ano.

Dados publicados no SNIS (2015) expõem a tendência do crescimento da cobertura de coleta e tratamento de esgotos no Brasil, ainda que se necessite avançar muito no saneamento do país. Os dados mostram que existem 99.425.658 habitantes com acesso ao esgotamento sanitário, o que corresponde a apenas 48,63% da população brasileira (IBGE, 2015). Em 2015 foram tratados nas ETEs do Brasil 3.805.022 mil m³ de esgotos (SNIS, 2015) o que corresponde a apenas 42,7% de todo o esgoto gerado. Levando-se em consideração que cada m³ de esgoto bruto possui em média 0,227 kg de sólidos secos totais (SANTOS, 2003), pode-se estimar a produção de lodo de esgoto na base seca no ano de 2015, de aproximadamente 863.740 toneladas, o que corresponde à um aumento de 238% na geração de lodo de esgoto em 10 anos.

A região sudeste é a que apresenta os melhores índices de coleta e tratamento de esgotos no Brasil, coletando 78,3% do esgoto gerado e tratando 45,7% deste montante (SNIS, 2015). No entanto, no estado do Rio de Janeiro apenas 54,08% do esgoto gerado é coletado e destes, somente 58,68% são tratados. O Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Rio de Janeiro estima que sejam produzidos diariamente, aproximadamente 365 toneladas de lodo de esgoto no estado, totalizando 133.225 toneladas por ano (PERS, 2014).

Embora tenha-se avançado no saneamento básico nas últimas décadas, as taxas de coleta e tratamento de esgotos no Brasil, 48,63% e 42,7%, respectivamente (SNIS, 2015), ainda são baixas e muito aquém das metas estabelecidas no Plano Nacional de Saneamento Básico, que pretende atender 93% da população brasileira com coleta e tratamento de esgoto sanitário até 2033 (BRASIL, 2014). Levando-se em consideração a população brasileira de 204.450.649 habitantes (IBGE, 2015), caso a cobertura de coleta e tratamento de esgotos venha a atender 93% da população, como pretendido, a geração de lodo de esgoto será de aproximadamente 2.462.608 toneladas de sólidos secos por ano. Diante deste cenário de tendência de crescimento na cobertura da coleta e tratamento de esgotos nas próximas décadas, é imprescindível que o avanço no saneamento básico, venha acompanhado com alternativas factíveis e sustentáveis de disposição final do lodo de esgoto, visto que este, sem o devido tratamento e estabilização pode ser prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente (BRASIL, 2006).

3.3. DISPOSIÇÃO FINAL

A Lei Federal Nº 12.305 de 2010 (BRASIL, 2010), que institui a política nacional de resíduos sólidos, define que deve ser destinado aos aterros sanitários apenas resíduos sólidos cuja as possibilidades tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis tenham se esgotado. No entanto, no que se refere destinação final de lodo de esgoto, esta premissa não vem sendo cumprida, visto que este é um material com potencial para reciclagem e quase a totalidade do lodo de esgoto gerado no Brasil é destinado diretamente aos aterros sanitários, sendo este processo denominado “co-disposição”, visto que o lodo é disposto juntamente com outros resíduos sólidos domiciliares (LUDUVICE; FERNANDES, 2001).

A dificuldade de abertura de novos aterros sanitários e terceirização ou fechamento de aterros públicos, tem elevado o custo de disposição destes resíduos e a tendência é que as ETE's procurem outros meios de disposição final nos próximos anos (BIELSCHOWSKY, 2014). Embora seja ambientalmente seguro a disposição do lodo de esgoto em aterros sanitários, o mesmo acaba imobilizando grandes quantidades de nutrientes e matéria orgânica, que poderiam estar sendo reciclados.

A reciclagem ou reaproveitamento do lodo de esgoto é uma prática bastante difundida em diversos países como Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Alemanha, Japão, Austrália,

Nova Zelândia, Portugal, Espanha, França, dentre outros (LU et al., 2014; MININNI et al., 2014; BOURIOUG et al., 2015; CHRISTODOULOU; STAMATELATOU, 2016; WALLACE et al., 2016; EUROSTAT, 2015). Cada país ou região define as estratégias de reciclagem do lodo de esgoto dependendo das suas necessidades ou vocações, que podem incluir desde a geração de energia (REN et al., 2017), produção de combustíveis, cimento e agregados leves (MENDOZA et al., 2010; WERLE; WILK, 2010; MATSUMIYA, 2014), recuperação de nutrientes escassos como o fósforo (TORRI et al., 2017; EGGLE et al., 2015), recuperação de metais raros (WESTERHOFF et al., 2015), utilização como condicionador de solos e fertilizante em cultivos agrícolas, florestais e recuperação de áreas degradadas (SAMPAIO et al., 2012; CIESLIK et al., 2015; MARRON et al., 2015; SAMPAIO et al., 2016; ABREU et al., 2017b; GUERRINI et al., 2017), até como substrato para produção de mudas florestais e ornamentais (SCHEER et al., 2012; TRAZZI et al., 2014; ABREU et al., 2017a; CABREIRA et al., 2017).

Dentre as potenciais opções de reciclagem do lodo de esgoto, a mais antiga e mais difundida é a utilização em cultivos agrícolas, florestais e na recuperação de áreas degradadas, principalmente em função da baixa tecnologia necessária e baixo custo inicial de implantação quando comparado com outros métodos de reaproveitamento. Muitos autores descrevem os benefícios ambientais, sociais e econômicos da reciclagem do lodo de esgoto em áreas agrícolas e florestais, como a melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo (SAMPAIO et al., 2012; BONINNI et al., 2015; YADA et al., 2015; KOMINKO et al., 2017) a reciclagem dos nutrientes contidos no lodo, principalmente elementos escassos e finitos, como P e alguns micronutrientes (TORRI et al., 2012; WESTERHOFF et al., 2015; TORRI et al., 2017); o aumento da matéria orgânica no solo (TALAVERA et al., 2010; YADA et al., 2015), melhoria na produtividade de culturas agrícolas e florestais (LOBO et al., 2012; MARRON, 2015; et al., 2015), diminuição dos custos com fertilizantes químicos e condicionadores de solos, aumentando a renda de produtores rurais (BITTENCOURT et al., 2014; ABREU et al., 2017a), contribuição para minimizar os efeitos das mudanças climáticas, através do aumento do estoque de carbono orgânico no solo (TORRI et al., 2012; OUMMET et al., 2015; KACPRZAK et al., 2017), além de diminuir a pressão sobre os aterros sanitários.

Embora o Brasil apresente grande potencial para reciclagem do lodo de esgoto, com vastas áreas de pastagens degradadas, solos exauridos e com grandes áreas de produção agrícola e florestal, ainda são escassos os programas de reciclagem do lodo de esgoto, o que coloca o Brasil na contra mão da tendência mundial de aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos. Na Espanha, a região da Catalunha dispõe em solos agrícolas e florestais mais de 85% do lodo gerado nas estações de tratamento de esgotos (VASKAN et al., 2013). Portugal, Irlanda, Reino Unido, França e Luxemburgo dispõem diretamente em solos agrícolas mais de 75% do lodo gerado (EUROSTAT, 2015; BOURIOUG et al., 2015). Outros Países, como República Tcheca, Lituânia Hungria, Estônia, Finlândia e Noruega também dispõem mais de 75% do lodo de esgoto em solos agrícolas, no entanto, estes países optam pela compostagem de parte deste material antes da aplicação (EUROSTAT, 2015).

A Austrália é um dos Países que mais se destacam na reciclagem agrícola e florestal do lodo de esgoto, destinando 80% da produção de lodo para esta finalidade (PRITCHARD et al., 2010). A região metropolitana de Western Austrália produz anualmente 21.000 toneladas de lodo seco e recicla 100% do lodo gerado, sendo destinados 80% para uso agrícola e florestal, 17% para compostagem e 3% para pesquisas (PRITCHARD et al., 2010).

Nos Estados Unidos cerca de 60% do lodo de esgoto gerado no país é destinado a reciclagem em solos agrícolas, silvicultura e recuperação de áreas degradadas (LU et al., 2012). No entanto, alguns Estados como Califórnia (91%) e Colorado (78%), esta forma de disposição é adotada em maior proporção, chegando inclusive a ser comercializado, gerando considerável retorno para as empresas de saneamento (Le BLANC et al., 2008).

Com as estimativas de crescimento populacional e avanço nos serviços de saneamento, a tendência é de crescimento na geração de lodo de esgoto em todo mundo. Para que este resíduo não se torne um passivo ambiental, é importante que o crescimento na geração deste material venha acompanhada de alternativas factíveis e sustentáveis de disposição final.

3.4. RECICLAGEM AGRÍCOLA

Estima-se que a população mundial em 2050 seja de 9.3 bilhões de pessoas e para alimentar essa população, a demanda mundial de alimentos deve crescer 60% nos próximos 40 anos (LEE, 2011). Como a produção de alimentos está intrinsecamente relacionado com o consumo de fertilizantes químicos, a tendência é de crescimento da demanda e dos preços destes fertilizantes. Apenas entre 2014 e 2018 a estimativa de crescimento anual da demanda de N, P e K é de 1.4, 2.2 e 2.6% ao ano, respectivamente (FAO, 2015).

No caso do P, o aumento da demanda pode significar o esgotamento mais rápido de suas reservas, visto que este é um recurso finito e não renovável e que se mantido o ritmo atual, suas reservas mundiais podem se exaurir nos próximos 50 a 130 anos (CORDELL et al., 2009; TORRI et al., 2012). Tendo em vista a importância do P para todas as formas de vida, torna-se necessário minimizar as perdas deste nutriente e converter sua utilização em um ciclo fechado, para prolongar o máximo possível suas fontes (KOMINKO et al., 2017). Neste sentido, a aplicação agrícola do lodo de esgoto pode ser uma alternativa estratégica para reciclar os nutrientes presentes no esgoto gerado nos grandes centros urbanos, fechando o ciclo entre o campo e a cidade (ABREU et al., 2017b).

Além dos benefícios ecológicos e econômicos, deve-se observar as vantagens técnicas da utilização do lodo de esgoto na agricultura. A aplicação deste material no solo aumenta o teor de matéria orgânica, a porosidade, retenção de umidade, capacidade de troca catiônica, disponibilidade de nutrientes e diminui a densidade (LU et al., 2012). A melhoria nas características químicas, físicas e biológicas do solo após a aplicação de lodo de esgoto refletem positivamente na produtividade das culturas agrícolas, podendo substituir parcialmente ou integralmente a fertilização química e minimizar os custos de produção (BARBSOSA; TAVARES FILHO, 2006; BITTENCOURT et al., 2014; LOZADA et al., 2015).

Nogueira et al. (2008) não encontraram diferenças significativas entre a aplicação de lodo de esgoto e a fertilização mineral recomendada, em relação a produção de matéria seca e a produtividade de grãos de milho. Silva et al. (2002) analisando o efeito do lodo de esgoto na produção de milho, observaram que o lodo foi 25% superior a fertilização com superfosfato triplo em relação a produção de grãos.

Marques et al. (2007) e Lozada et al. (2015) não encontraram diferenças significativas na produtividade e nas propriedades agroindustriais de cana de açúcar fertilizada com 40 t ha⁻¹ de lodo de esgoto na base úmida em comparação com a fertilização química recomendada para a cultura. Resultados semelhantes foram encontrados por outros autores, que confirmaram a economia na fertilização química quando aplicado lodo de esgoto nos solos cultivados com cana de açúcar, sem alterações nas características químicas, morfológicas e industriais da planta (SILVA et al., 1998; CHIBA et al., 2008; FRANCO et al., 2010). Chiba et al. (2008) e Franco et al (2010) analisaram a eficiência do lodo de esgoto na fertilização da cana de açúcar e concluíram que o lodo pode suprir até 100% da necessidade de adubos nitrogenados para a cultura.

Outras culturas também já possuem estudos comprovando os benefícios técnicos da reciclagem agrícola do lodo de esgoto. Lemainski; Silva (2006) observaram que doses de 30 t ha⁻¹ de lodo de esgoto úmido foram 18% mais eficientes em relação a fertilização mineral na produtividade da cultura da soja. Os autores atribuem os melhores resultados em função da

dinâmica de liberação de nutrientes pelo lodo de esgoto, que por estarem em sua maioria na forma orgânica, são liberados gradativamente e proporcionam melhor aproveitamento pelas plantas.

Para a cultura do feijão, Lobo et al. (2012) avaliaram a efetividade da fertilização com lodo de esgoto e observaram que o aumento nas doses de lodo promoveu incremento no número de vagens, rendimento de matéria seca, rendimento de grãos e na massa de 1000 grãos e de forma geral, apresentou resultados superiores a fertilização química recomendada para a cultura. Lobo et al. (2013) avaliando o uso do lodo de esgoto na fertilização de áreas com rotação de culturas agrícolas, observaram o incremento na matéria seca e no rendimento de grãos de aveia, trigo, triticale, girassol e feijão.

Dantas (2010) ao comparar a fertilização química com a aplicação de lodo de esgoto para a cultura do tomate (*Solanum lycopersicum*), observou que o lodo foi mais eficiente na nutrição das mudas de tomate e aumentou o número de frutos por planta, a massa dos frutos e a produtividade da cultura. Carbonell et al. (2016) encontraram resultados semelhantes, em que comparando dois tipos de lodo de esgoto e a fertilização mineral, observaram os melhores resultados de produção do tomateiro nos tratamentos com lodo. Estes autores avaliaram ainda o risco de contaminação dos tomates por metais pesados e concluíram que os níveis encontrados nos frutos foram insignificantes.

Martins et al. (2015) analisaram o efeito da aplicação de lodo de esgoto em complementação a fertilização química, na nutrição e produção de plantações comerciais de café e constataram que o uso de lodo pode ser empregado em complementação a fertilização química, melhorando a produtividade na cultura do cafeeiro. A aplicação de lodo de esgoto na fertilização complementar da cultura do café melhora a produtividade e não interfere nas características qualitativas e sensoriais da bebida (MARTINS et al., 2005).

O lodo de esgoto pode ser utilizado também na fruticultura, melhorando a nutrição e produtividade de culturas como laranja (LAMBERT, 2013; ROMEIRO et al., 2014), tangerina (SANTOS et al., 2011), maracujá (OLIVEIRA et al., 2009; FREITAS et al., 2015); abacaxi (MAIA, 2013); banana (COELHO et al., 2011; FORTES, 2011), mamão (BONOMO, 2014) e goiaba (COSTA; COSTA, 2011).

Além dos benefícios técnicos e ambientais a reciclagem do lodo de esgoto na agricultura pode representar também um significativo benefício econômico e social. Bittencourt et al. (2014) analisando o Programa de reciclagem agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná, verificaram que entre 2007 e 2010, foram destinados a agricultura 33.404 t de lodo de esgoto na base seca, para fertilizar 2.288 ha de áreas agrícolas cultivadas com milho, soja, sorgo, cana de açúcar, feijão, aveia, trigo e frutíferas arbóreas. De acordo com os autores, os 80 agricultores beneficiados pelo Programa, economizaram em média U\$\$ 813,45 por hectare relativo a aquisição de fertilizantes químicos e condicionadores de solo, o que representa um grande avanço social e econômico.

A reciclagem agrícola do lodo de esgoto deve ser acompanhada do desenvolvimento de tecnologias que permitam o processamento e controle da qualidade do lodo de esgoto produzido, o controle das formas de comercialização e distribuição e a inserção do produto nos sistemas agrícolas, de forma a maximizar os impactos positivos e minimizar os impactos negativos (ANDREOLI, 1999). Ou seja, deve-se buscar não apenas reaproveitar um resíduo, mas principalmente gerar um produto com qualidade satisfatória que possa ser amplamente utilizado nos diferentes segmentos.

3.5. RECICLAGEM FLORESTAL

Embora a utilização agrícola do lodo de esgoto seja uma das alternativas mais promissoras para a disposição deste resíduo, retornando ao campo os nutrientes exportados para os grandes centros urbanos, a presença de metais pesados, organismos patogênicos ou alguns contaminantes orgânicos, pode limitar a aplicação de alguns lodos, principalmente em virtude do risco de contaminação dos solos e transferência ao homem pela adsorção e translocação desses elementos nas plantas (BERTON e NOGUEIRA, 2010). Deste modo, a reciclagem do lodo de esgoto na área florestal pode ser uma alternativa de aproveitamento dos lodos que não atendem parcialmente os padrões de qualidade para uso na agricultura, pois reduz os riscos de contaminação, por não ser uma atividade que envolve produtos para o consumo direto do homem (GARCIA et al., 2012).

Assenheimer (2009) lista as principais vantagens da utilização florestal do lodo de esgoto em detrimento a reciclagem agrícola: (i) menor risco de entrada de contaminantes na cadeia alimentar humana; (ii) os solos florestais geralmente são pobres, o que resulta em melhor aproveitamento da matéria orgânica e nutrientes contidos no lodo de esgoto; (iii) o ciclo longo das culturas florestais permite intervalos maiores entre uma aplicação e outra, diminuindo os riscos de acumulação de contaminantes por aplicações sucessivas; (iv) as culturas florestais respondem a aplicação de lodo de esgoto com significativo aumento de biomassa e nutrientes no ecossistema; (v) a trama complexa de raízes perenes, profundas e bem distribuídas, aumenta a eficiência de absorção dos nutrientes e diminui os riscos de lixiviação; (vi) a presença dos nutrientes do lodo de esgoto na forma orgânica, que são mineralizados lentamente, é mais compatível com a velocidade de absorção das espécies florestais.

Na área florestal o lodo de esgoto pode ser aproveitado de diferentes formas, desde substrato para produção de mudas florestais, condicionador de solos para recuperação de áreas degradadas, até como fertilizante em plantios comerciais, na restauração florestal e em plantios de arborização urbana (BONINI et al., 2015; LIMA FILHO, 2015; MARRON, 2015; DONOSO et al., 2016; ABREU et al., 2017a; CABREIRA et al., 2017a; GUERRINI et al., 2017).

Na produção de mudas florestais o lodo de esgoto tem apresentado resultados superiores aos substratos disponíveis no mercado, demonstrando elevado potencial para esta finalidade (TRAZZI et al., 2014; SANTOS et al., 2014; ABREU et al., 2017a; CABREIRA et al., 2017). Uma das principais vantagens do lodo de esgoto como substrato é o melhor aproveitamento dos nutrientes pelas plantas, visto que parte dos nutrientes estão na forma orgânica e são liberados gradativamente, suprimindo as necessidades nutricionais das mudas de forma mais adequado durante o ciclo de produção (ASSENHEIMER, 2009; ABREU et al., 2017a).

Abreu et al. (2017a) analisando diferentes resíduos urbanos na produção de mudas de *Lafoensia pacari* em tubetes de 280 cm³, observaram que as mudas produzidas nos três tratamentos que continham substrato constituído de 100% de lodo de esgoto obtiveram resultados de crescimento superiores aos demais tratamentos, inclusive, em relação ao substrato comercial a base de casca de *Pinus* bioestabilizada. Foi constatado ainda, que as mudas apresentaram qualidade satisfatória sem necessidade de fertilização química, o que representa uma simplificação no processo de produção de mudas florestais em tubetes.

Rocha et al. (2013) testaram diferentes proporções de composto de lodo de esgoto (lodo + poda de árvores) e casca de arroz carbonizada para produção de mudas de eucalipto e compararam com um substrato comercial de turfa de esfagno enriquecido com calcário dolomítico, gesso agrícola e fertilizante NPK. Os autores concluíram que o composto de lodo de esgoto pode ser empregado na produção de mudas de eucalipto nas proporções de 60 a 100%, com resultados superiores ao substrato comercial testado.

Cabreira et al. (2017a) ao analisar o potencial do lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Peltophorobium dubium*, *Lafoensia pacari* e *Ceiba speciosa* em sacos plásticos de 14 x 20 cm, concluíram que as mudas produzidas nas proporções de 40 a 80% de lodo de esgoto em mistura com argila, apresentaram maior crescimento quando comparado ao substrato padrão utilizado (40% esterco bovino curtido, 50% argila e 10% areia). Os autores observaram ainda, que o lodo de esgoto testado possuía baixa densidade, e portanto, o substrato com 80% de lodo de esgoto apresentou menor peso final, o que favorece consideravelmente a logística de transporte e distribuição das mudas produzidas em recipientes de maior volume.

Outra utilização potencial do lodo de esgoto na área florestal é como fertilizante em plantios comerciais, principalmente de espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. A aplicação de lodo de esgoto pode substituir a fertilização nitrogenada, fosfatada e de micronutrientes (exceção do boro), sem afetar a produção de madeira (SILVA et al., 2008). Silva et al. (2011) analisaram o efeito da aplicação de lodo de esgoto no crescimento e nutrição de plantios de *Eucalyptus grandis* durante os três primeiros anos após o plantio e observaram que a aplicação de lodo de esgoto complementado com boro, obteve resultados estatisticamente iguais a fertilização química convencional. Já Rocha et al. (2004) analisaram a fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis*, fertilizado com lodo de esgoto e observaram que a produtividade de biomassa seca de madeira foi superior nos tratamentos que receberam lodo de esgoto, em comparação aos tratamentos que receberam apenas adubação mineral.

Abreu Júnior et al. (2017) analisaram a aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto e sua interação com fertilizantes nitrogenados e fosfatados no volume de madeira em um plantio de *Eucalyptus grandis* e constataram que a fertilização com lodo de esgoto reduziu a necessidade de N e P em 100% e aumentou em 7% a produtividade em volume de madeira do plantio. É importante salientar que a fertilização com lodo de esgoto não altera as características físicas e químicas e tecnológicas da madeira como teor de nutrientes, teor de celulose, lignina, extrativos e poder calorífico (BARREIROS et al., 2007).

Xue et al. (2015) ao analisar a aplicação de 0, 3 e 6 t ha⁻¹ de lodo de esgoto na base seca em plantação de *Pinus radiata*, verificaram que 19 anos após a aplicação as doses de 3 e 6 t ha⁻¹ proporcionaram incremento em volume de 25 e 34%, respectivamente, em relação ao controle. Ouimet et al. (2015) analisaram os efeitos de doses de lodo de esgoto (0, 10, 15 e 30 t ha⁻¹ na base seca) em plantios de três espécies florestais comerciais, aos 19 anos após a aplicação. Os autores constataram que a aplicação de 30 t ha⁻¹ não resultou em acúmulo de metais no solo, melhorou as características químicas e físicas do solo e aumentou o volume de madeira em 18% para *Pinus resinosa*, em 62% para *Picea glauca*, e 700% para *Quercus sp.* em relação ao controle sem fertilização.

De acordo com Carpanezzi et al. (1990), em locais com solos degradados, a ausência de matéria orgânica faz com que estas áreas apresentem baixa resiliência, ou seja, a reação ambiental para retorno as condições anteriores pode não ocorrer ou ser muito lenta. Sendo assim, o alto teor de matéria orgânica contido no lodo de esgoto pode ser uma ferramenta fundamental na recuperação de áreas degradadas e na restauração florestal. A aplicação de lodo de esgoto em solos degradados pode melhorar a densidade, agregação, porosidade, capacidade de retenção de água, disponibilidade de nutrientes e matéria orgânica, características essenciais para suportar um sistema florestal (SAMPALIO et al., 2012; BONINI et al., 2015).

Carreño; Cataño (2007) avaliaram a evolução da vegetação em áreas degradadas pela mineração que receberam lodo de esgoto como estratégia de restauração e verificaram um aumento na cobertura vegetal, riqueza e diversidade de espécies um ano após a aplicação. Fraga (2016) analisou a aplicação de lodo de esgoto combinado com o plantio de espécies

florestais nativas do Cerrado na recuperação de áreas de empréstimo e observaram que o lodo melhorou a fertilidade do solo e favoreceu a sobrevivência e crescimento das mudas.

Paiva et al. (2009) analisaram o efeito da aplicação de lodo de esgoto no crescimento inicial de quatro espécies nativas da Mata Atlântica e observaram que a aplicação favoreceu o crescimento em altura e biomassa das mudas e não diferenciou estatisticamente do tratamento com fertilização mineral. Lima Filho (2015) analisou o crescimento inicial de mudas de *Ceiba speciosa* após aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto (0, 0.8, 1.6, 3.2 e 6.4 L planta⁻¹) como fertilizante de plantio e constatou que a dose ideal foi de 3,6 L planta⁻¹, e que mesmo a menor dose de lodo (0.8 L) foi superior em comparação com a fertilização química recomendada (178 g planta⁻¹ de superfosfato simples). O autor observou ainda que o crescimento em altura não respondeu proporcionalmente a adição de lodo de esgoto, porém, a medida que se aumentou a dose de lodo, houve incremento na área de copa das plantas, o que é positivo, pois reflete maior capacidade de cobertura do solo.

Além dos benefícios relacionados ao crescimento da vegetação, é imprescindível que a aplicação de lodo de esgoto na restauração florestal seja realizada de forma responsável para evitar a contaminação do meio ambiente. Sampaio et al. (2016) analisaram o impacto ambiental no solo e na vegetação, em função da aplicação de doses de 2,5 a 20 t de lodo de esgoto por hectare e não encontraram concentrações tóxicas de metais pesados no solo e nas folhas das nove espécies florestais analisadas um ano após a aplicação.

O teor de matéria orgânica e nutrientes contidos no bio sólido podem favorecer ainda o condicionamento de solos urbanos, visando plantios de arborização urbana, paisagismo, implantação e manutenção de parques, entre outras necessidades das áreas urbanas. Os solos urbanos normalmente são altamente antropizados e possuem condições desfavoráveis ao crescimento das plantas, como pH desfavorável, características físicas, químicas e biológicas inadequadas, teor de nutrientes insuficientes e desequilibrados, problemas de compactação, além da presença de entulhos e outros materiais (CAPRA et al., 2015). A aplicação de lodo de esgoto pode melhorar as condições destes solos urbanos e favorecer o crescimento das espécies vegetais de interesse paisagístico (GUERRINI et al., 2017). A principal vantagem da utilização do lodo de esgoto em solos urbanos é a proximidade das áreas de uso com as estações onde o lodo é gerado, economizando no transporte do material.

3.6. VALORAÇÃO DO LODO DE ESGOTO

A técnica mais empregada nos estudos de valoração de lodos de esgoto é técnica de valoração de mercado de bens substitutos (QUINTANA et al., 2009; GHAZY et al., 2009; MARCON et al., 2015). Segundo Motta (1998), esta é uma das técnicas mais simples de valoração, pois se pode comparar, sempre que for possível, o preço do bem analisado por preços de determinados insumos semelhantes cujo o mercado já está estabelecido. Desta forma, para valorar o lodo de esgoto pode-se comparar os preços de fertilizantes, condicionadores de solos e substratos disponíveis no mercado, dependendo da utilização que será empregado o material. Por exemplo, se a utilização do lodo será como fertilizante, deve-se analisar as quantidades de NPK e matéria orgânica contidos no lodo de esgoto e comparar com o preço de mercado de fertilizantes químicos. Se a utilização for como substrato para produção de mudas, pode-se comparar o lodo com materiais orgânicos destinados a esta finalidade, como casca de pinus bioestabilizada, esterco bovino compostado, turfa de esfagno, entre outros.

Para Kvarnstrom; Nilsson (1999) o preço do lodo de esgoto fresco também pode ser determinado pela demanda do produto e não necessariamente pelo valor intrínseco de fertilização. Seus resultados mostram que apenas aqueles municípios com demanda igual ou maior que a capacidade de produção de lodos de esgoto são capazes de cobrar pelo lodo de

esgoto. Nos demais, o lodo de esgoto é entregue gratuitamente e, em alguns casos, com frete subsidiado, como estratégia de indução de demanda.

Dentre os diferentes métodos de higienização do lodo de esgoto, a secagem térmica é a que mais agrega valor ao material final, confirmando a hipótese de que a água interfere substancialmente na valoração do lodo. Corrêa; Corrêa (2001) que encontraram R\$ 22,20 por tonelada de lodo fresco (88% de umidade) e constataram valor agregado de R\$158,60 para lodo seco termicamente (menos de 10% de umidade). Lemainski e Silva (2006) encontraram valores equivalentes a R\$ 30,44 por tonelada de lodo úmido (90% de umidade) e caso o mesmo lodo fosse seco, com umidade a 10%, os autores calcularam o valor agregado de R\$ 273,97.

Um dos caminhos para valoração de resíduos sólidos é buscar as possibilidades de usos e reaproveitamento para lodo de esgoto, enxergando-o como um produto rico em matéria orgânica e nutrientes, que devidamente processado pode atender a parte da demanda do mercado por fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo. Nos Estados Unidos, algumas empresas de saneamento já comercializam fertilizantes e condicionadores de solos derivados de lodo de esgoto desde a década de 80, e atualmente encontram-se no mercado mais de 30 marcas comerciais de lodo de esgoto.

3.7. SEGURANÇA AMBIENTAL

A disposição agrícola florestal sem o devido planejamento ou conhecimento do material pode resultar em impactos ambientais negativos. É característica do tratamento de esgoto a decantação de organismos patogênicos, compostos orgânicos complexos e moléculas ligadas a metais pesados (BETTIOL; CAMARGO, 2006). Caso o lodo não seja submetido ao devido tratamento, estes poluentes podem ser transferidos ao solo, às plantas e às águas superficiais e subterrâneas, através de processos de escoamento superficial e lixiviação (FERNANDES et al., 1993).

A presença de nitratos na composição do lodo também pode ser um problema, devido à falta de sincronismo entre a mineralização do nitrogênio e a absorção deste nutriente pelas plantas, correndo-se o risco de perdê-lo por lixiviação levando à contaminação do lençol freático (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

Semelhante ao nitrogênio, outro possível problema é a lixiviação do fosfato, pois com a adição de lodo de esgoto a capacidade de adsorção do elemento pode ser modificada (MUNHOZ; BERTON, 2006). Isto pode ocorrer devido à liberação de ácidos orgânicos durante a decomposição do lodo, que podem bloquear os mesmos sítios de adsorção usados pelo fósforo, diminuindo a fixação do elemento no solo ou substrato (HAYNES, 1984)

3.8. ÁREAS APTAS A APLICAÇÃO DE LODO DE ESGOTO

Apesar de seu benefício fertilizante, a aplicação de lodo de esgoto no solo necessita de uma gestão cuidadosa, para evitar potenciais impactos negativos, principalmente relacionados ao acúmulo de metais pesados e contaminação por compostos orgânicos (TORRI et al., 2012). Para diminuir os riscos ambientais da aplicação de lodo de esgoto no solo, a resolução CONAMA nº 375 / 2006 (BRASIL, 2006) em sua Seção V, apresenta as restrições Locacionais e da Aptidão das Áreas de Aplicação, descritas no artigo 15, sobre quais áreas não será permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado e define critérios a serem verificados para definir se a área pode ou não receber um projeto de reciclagem. Aspectos como proximidade de residências e de cursos d'água, áreas de preservação permanente, áreas de proteção de mananciais, unidades de conservação, áreas declivosas e solos rasos ou hidromórficos, são restritivos a aplicação de lodo de esgoto (BRASIL, 2006).

Nos últimos anos, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) foram aplicados extensivamente em vários campos ambientais, integrando dados de diferentes fontes, visando

facilitar a interpretação dos mesmos (PASSUELO et al., 2012). Como a definição das terras agrícolas adequadas à aplicação do lodo de esgoto é uma questão complexa, que envolve conjunto de critérios, que são baseados em dados da literatura, da legislação e conhecimento de especialistas (PASSUELO et al., 2012), as ferramentas SIG podem facilitar análise espacial e locacional destas áreas. Souza et al. (2008) desenvolveram, a partir do sistema de classificação das terras adaptada aos solos tropicais (LEPSH et al., 1991), uma classificação própria para a seleção de áreas destinadas à disposição do lodo quando esta for feita com finalidade agrícola. Empregaram fatores ambientais definidos a partir da interação do lodo com o solo e com a paisagem, definindo as classes de uso (apta e inapta) em função do impacto gerado pelas interações.

A identificação dessas áreas aptas pode ser realizada com a ajuda de ferramentas para tomada de decisão espaciais, uma vez que permitem identificar, por meio técnicas de geoprocessamento, os melhores locais para a aplicação de lodo de esgoto de uma determinada região, provendo informações que subsidiem a tomada de decisão sobre as melhores áreas para aplicação de lodo de esgoto como insumo agrícola. O uso dessa ferramenta computacional permite não somente mais rigor e precisão nas análises, mas também a integração, que possibilita o armazenamento e o gerenciamento desses dados como parte do conjunto total das geoinformações disponíveis e registradas.

4. REFERÊNCIAS

ABREU, A. H. M., MARZOLA, L. B., MELO, L. A., LELES, P. S. S., ABEL, E. L. S., ALONSO, J. M. Urban solid waste in the production of *Lafoensia pacari* seedlings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 83–87, 2017a.

ABREU, A. H.M., LELES, P. S. S., ALONSO, J. M., ABEL, E. L. S., OLIVEIRA, R. R. Characterization of sewage sludge generated in Rio de Janeiro , Brazil , and perspectives for agricultural recycling, **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4, suplemento, p. 2433 – 2448, 2017b.

ANDREOLI, C. V. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura e sua influência em características ambientais no agrossistema**. 1999, 121 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ANDREOLI, C.; GARBOSSA, L.; LUPATINI, G.; PEGORINI, S. “**A Brazilian approach in United Nations Human Settlements Programme**”, in LeBLANC, R.; MATTHEWS, P.; ROLAND, P. (eds). *Global Atlas of Excreta Wastewater Sludge, and Biosolids Management: Moving Forward the Sustainable and Welcome Uses of a Global Resource*. UN-Habitat, Nairobi, p. 31 – 46.

ASSENHEIMER, A. Benefícios do uso de biossólidos como substratos na produção de mudas de espécies florestais. **Ambiência**. v. 5, n. 2, p. 321-330, 2009.

BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J. Uso agrícola do biossólido: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. **Ciências Agrárias**, v. 27, n. 04, p. 565-580, 2006.

BARREIROS, R. M.; GONÇALVES, J. L. M.; SANSÍGOLO, C. A.; POGGIANI, F. Modificações na produtividade e nas características físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado. **Revista Árvore**, v. 31, n. 1, p. 103 – 111, 2007.

BERTON, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R. **Uso de lodo de esgoto na agricultura**. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T.A.R.; PIRES, A. M. M. Uso agrícola de lodo de esgoto - Avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA. 2010, Botucatu: FEPAF, 2010, p. 31-50.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: Impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2006. 349 p.

BIELSCHOWSKY, M. C. **Modelo de Gerenciamento de Lodo de Estação de Tratamento de Esgotos: Aplicação do Caso da Bacia da Baía de Guanabara**. 2014, 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; GOMES, D. Sewage sludge usage in agriculture: a case study of its destination in the Curitiba Metropolitan REGION, Paraná, Brazil. **Water Air and Soil Pollution**, v. 225, p.1 – 8, 2014.

BONINI, C.S.B. ; ALVES, M.C ; MONTANARI, R. Lodo de Esgoto e Adubação Mineral na Recuperação de Atributos Químicos de Solo Degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.4, p. 388-393, 2015.

BONOMO, M. M. **Efeitos citogenéticos, bioquímicos, morfológicos e anatômicos da aplicação de lodo de esgoto higienizado em Carica papaya L**. 86 f., Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) 2014,

BOURIOUG, M.; GIMBERT, F.; ALAOUI-SEHMER, L. BENBRAHIM, M.; ALEYA, L.; SOSSÉ, B. A. Sewage sludge application in a plantation: Effects on trace metal transfer in soil – plant – snail continuum. **Science of the Total Environment**, v. 503, p. 309-314, 2015.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 02 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 2010.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB)**, 2014. Disponível em: http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/ . Acesso em: 3 out. 2016.

BRASIL. Ministério das Cidades. Programa de Modernização do Setor Saneamento. **Sistema nacional de informações sobre saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgoto**. Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Ministério das Cidades. Programa de Modernização do Setor Saneamento. **Sistema nacional de informações sobre saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgoto**. Brasília, DF, 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução – CONAMA. Resolução no 375/2006**. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n. 167, p. 141-146, 30 ago 2006.

CABREIRA, G. V., LELES, P. S. S., ALONSO, J. M., ABREU, A. H. M., LOPES, N. F., SANTOS, G. R. Biossólido como componente de substrato para produção de mudas florestais. **Floresta**, v. 47, n. 2, p. 165–176, 2017.

CAPRA, G. F., GANGA, A., GRILLI, E., VACCA, S., BUONDONNO, A. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective. **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, n. 7, p. 1602 -1618, 2015.

CARBONELL, G.; TORRIJOS, M.; RODRIGUES, J. A.; PORCEL, A. M. Uptake and metal transfer from biosolid amended soil to tomato (*Solanum lycopersicum* Mill L.) plants. **Ecophysiology**, v. 1, n. 1, p. 1 – 8, 2016.

CARPANEZZI, A. A.; COSTA, L. G. S.; KAGEYAMA, P. Y.; CASTRO, C. F. A. **Espécies pioneiras para recuperação de áreas degradadas: observações de laboratórios naturais** In: Congresso Florestal Brasileiro, 6o , Campos do Jordão, 1990. Anais, São Paulo, Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1990. p. 216-21.

CARREÑO, A. C. O.; CATAÑO, J. I. B. Efecto de La aplicación de biosólidos sobre El desarrollo de La vegetación em lãs primeras etapas sucesionales, en La cantera soratama, localidad de Usaquén, Bogotá. **Universitas Scientiarum**, v. 12, n. 2, p. 57 – 72, 2007.

CARVALHO, C. S.; RIBEIRINHO, V. S.; ANDRADE, C. A.; GRUTZMACHER, P.; PIRES, A. M. M. Composição Química da Matéria Orgânica de Lodos de Esgoto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.10, n.3, p. 413-419, 2015.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. Cultivo de cana de açúcar em Argissolo tratado com lodo de esgoto. I – disponibilidade de nitrogênio no solo e componentes de produção. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, v. 32, p. 643 – 652, 2008.

CHRISTODOULOU, A.; STAMATELATOU, K. Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 3, p. 453 – 462, 2016.

CIESLIK, B. M.; NAMIESNIK, J.; KONIECZKA, P. Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 1 – 15, 2015.

COELHO, H. A.; GRASSI FILHO, H.; ROMEIRO, J. C. T.; POMPERMAYER, G. V.; BARBOSA, R. D.; LOBO, T. F. Desempenho agrônômico do lodo de esgoto como fonte de nitrogênio em bananeiras. **Revista Agraria**, v. 4, n. 13, p. 172 – 181, 2011.

CORDELL, D., DRANGERT, J., WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, p. 292–305, 2009.

COSTA, A. N.; COSTA, A. F. S.; CAETANO, L. C. S. Aspectos químicos e físicos da disposição de lodo de ETE no solo. In: COSTA, A. N.; COSTA, A. F. S. **Manual de uso Agrícola e disposição de lodo de esgoto para o Estado do Espírito Santo**. Vitória, cap. 5, p. 37 – 43, 2011.

DANTAS, J. D. M. **Uso de lodo de esgoto como fonte alternativa de nitrogênio para o cultivo do tomateiro cereja (*Lycopersicon esculentum* sp.)**. 2010, 68 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Sergipe – São Cristóvão.

DONOSO, S.; ROJAS, K. P.; GALDAMES, E.; PACHECO, C.; ESPINOZA, C.; DURÁN, S.; GANGAS, R. Evaluación de la aplicación de biosólidos em plantaciones de *Eucalyptus globulus*, en Chile central. **Revista FCA Uncuyo**, v. 48, n. 2, p. 107 -119, 2016.

EGLE, L.; RECHBERGER, H.; ZESSNER, M. Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater Resources, Conservation and recycling. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.016>> Acesso em 21 de junho de 2016.

EUROSTAT – European Commission of Statistics – **Sewage sludge production and disposal from urban wastewater**, Ano 2015. Disponível em <<http://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>>. Acesso em 28 de maio de 2016.

FAO - **Food and Agriculture Organization of United Nations: World's Fertilizer Trends and Outlook to 2018**. Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome, 2015.

FERNANDES, F.; PIERRO, A. C.; YAMAMOTO, R. Y. Produção de fertilizante orgânico por compostagem do lodo gerado por estações de tratamento de esgotos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 5, p. 567 – 574, 1993.

FORTES, F. C. A. **Manejo do solo com lodo de esgoto na produção e qualidade de frutos em bananeira irrigada**. 2011, 127 f. Tese (Doutorado em agronomia) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu.

FRAGA, L. P. **Efeitos da aplicação de biossólido e resíduos de poda na revegetação de área de empréstimo no Distrito Federal**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

FRANCO, A.; HAMILTON, A.; PERECIN, D.; CARVALHO, O.; RIBEIRO, G.; SANTORO, B. Sewage sludge as nitrogen and phosphorus source for cane- plant and first ratoon crops. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 34, n. 2, p. 553-561, 2010.

FREITAS, A. R.; LOPES, J. C.; ALEXANDRE, R. S.; VENANCIO, L. P.; ZANOTTI, R. F. Emergência e crescimento de mudas de maracujá doce em função de lodo de esgoto e luz. **Comunicata Scientiae**, v. 6, n.2, p. 234 – 240, 2015.

GARCIA, G. O.; GONÇALVES, I. Z.; MADALÃO, J. C.; NAZÁRIO, A. A.; REIS, E. F. Crescimento de mudas de eucalipto submetidas à aplicação de biossólidos. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n.1, p. 87-94, 2012.

GHAZY, M. DOCKHORN, T. DICHTL, N. Sewage Sludge Management in Egypt: Current Status and Perspectives towards a Sustainable Agricultural Use. **World Academy of Science Engineering and Technology**. v. 3, n. 57, p. 299 – 307, 2009.

GUEDES, M. C., ANDRADE, C. A., POGGIANI, F., MATTIAZZO, M. E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.267-280, 2006.

GUERRINI, I.A., CROCE, C.G.G., BUENO, O. DE C., JACON, C.P.R.P., NOGUEIRA, T.A.R., FERNANDES, D.M., GANGA, A., AND CAPRA, G.F. Composted sewage sludge and steel mill slag as potential amendments for urban soils involved in afforestation programs. **Urban Forestry and Urban Greening**, v.22, p. 93–104, 2017.

HAYNES, R. J. Lime and phosphate in the soil plant system. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 37, p. 249 – 315, 1984.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - **Projeção da População do Brasil e das Unidades da Federação**. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>> Acesso em 15 de junho 2016.

KACPRZAK, M., NECZAJ, E., FIJAŁKOWSKI, K., GROBELAK, A., GROSSER, A., WORWAG, M., RORAT, A., BRATTEBO, H., ALMÅS, Å., AND SINGH, B.R. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. **Environmental Research**, v. 156, p. 39–46, 2017.

KOMINKO, H., GORAZDA, K., WZOREK, Z. The possibility of Organo-Mineral fertilizer production from sewage sludge. **Waste and Biomass Valorization**. v. 1, n. 1, p. 1 – 11, 2017.

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

LAMBERT, R. A. **Eficiência do uso de água residuária e de lodo de esgoto compostado nas propriedades químicas e físicas de solo cultivados com laranjeiras**. 2013, 92 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu.

Le BLANC, R.; MATTHEWS, P.; ROLAND, P. Global Atlas of Excreta Wastewater Sludge, and Biosolids Management: Moving Forward the Sustainable and Welcome Uses of a Global Resource. UN-Habitat, Nairobi, 378 p.

LEE, R. The outlook for population growth. **Science**, v. 333, p. 569– 573, 2011.

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

LIMA FILHO, P. **Biossólido na restauração florestal: produção de mudas e adubação de plantio**. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, 2015.

LOBO, T. F.; FILHO, H. G.; BULL, L. T.; SOUZA, F. L. P. Efeito do Nitrogênio e do Lodo de Esgoto na Nutrição do Feijoeiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.10, n.2, p.33-41, 2015.

LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H.; BULL, L. T. Efeito do nitrogênio e do lodo de esgoto nos fatores produtivos do feijoeiro. **Ceres**, v. 59, n. 1, p. 118 – 124, 2012.

LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H.; BULL, L. T.; MOREIRA, L. L. Q. Manejo do lodo de esgoto e nitrogênio mineral na fertilidade do solo ao longo do tempo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 2705 – 2725, 2013.

LOZADA, P. T.; LEAL, J. A. S.; OROBIO, B. A. P.; CASTRO, V. C. PARRA, C. A. M. Influencia de La aplicación de biosólidos sobre el suelo, la morfología y productividad del cultivo de caña de azúcar. **Revista U.D.C.A. Act.& Div. Cient.**, v. 18, n. 1, p. 69 – 79, 2015.

LU, Q.; HE, Z. L.; STOFFELLA, P. J. Land Application of Biosolids in the USA: a Review. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2012, p. 1 - 11, 2012.

LUDUVICE, M.; FERNANDES, F. Principais tipos de transformação e descarte do lodo. In: C. V. ANDREOLI; M. VON SPERLING e F. FERNANDES (Ed.). **Lodo de Esgotos: Tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v.6, 2001. P. 399-423.

MACHADO M. F. S. **A situação brasileira dos biosólidos**. 82 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente). Universidade de Campinas. Campinas, 2001.

MAIA, F. G. **Efeito da adubação com lodo de esgoto nas características químicas do solo, desenvolvimento vegetativo, produtividade e qualidade de frutos de abacaxizeiro cv. Vitória**. 2013, 64 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo – Vitória

MARCON, M.K.F.; FRIGO, E.P.; NOGUEIRA, C.E.C.; ALVES, H.J.; ALBRECHT, L.; FRIGO, J.P. Economic Viability of The Agricultural Recycling of Sewage Sludge in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**. v.10, pp. 2159-2164, 2015.

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

MARRON, N. Agronomic and environmental effects of land application of residues in short-rotation tree plantations: A literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 378 – 400, 2015.

MARTINS, D. R.; CAMARGO, O. A.; BATAGLIA, O. C. Qualidade do grão e da bebida em cafeeiros tratados com lodo de esgoto. **Bragantia**, v. 64, n. 1, p. 115 – 126, 2005.

MARTINS, D. R.; CAMARGO, O. A.; MELO, L. C. A.; RIBEIRINHO, V. S.; ANDRADE, C. A. Estado nutricional de cafeeiros comerciais após aplicações de lodo de esgoto como condicionador do solo. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 3, p. 248-256, 2015.

MATSUMIYA, Y. Green Energy Production from Municipal Sewage Sludge in Japan, **Japan Sewage Works Association**. 2014. Disponível em: <http://gcus.jp/wp/wpcontent/uploads/2014/06/ebd9e233be72625b03c96047573177f9.pdf> . Acessado em 2 de outubro de 2016.

MENDOZA, C. F. J.; IZQUIERDO, A. G.; MARTINEZ, F. G.; BOVEA, M. D.; PRATS, L. H. Opciones de valorización de lodos de distintas estaciones depuradoras de aguas residuales. **Ingeniería**. v. 14, n. 3, p. 177 – 190, 2010.

MININNI, G.; BLANCH, A. R.; LUCENA, F.; BERSELLI, S. EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. **Environmental Science Pollution Research**, v. 22, p. 7361 – 7374, 2015.

MOTTA, R.S. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, - MMA, IPEA, PNUD, CNPq.1998. 216p.

MUNHOZ, R. O.; BERTON, R. S. Disponibilidade de fósforo para o milho em solo que recebeu lodo de esgoto. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: Impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2006. 349p.

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

OLIVEIRA, J. P. B.; LOPES, J. C.; ALEXANDRE, R. S.; JASPER, A. P. S.; SANTOS, L. N. S.; OLIVEIRA, L. B. Concentração de metais pesados em plantas de maracujá doce cultivadas em dois solos tratados com lodo de esgoto. **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 217-223, 2009.

OUIMET, R., PION, A.-P., AND HÉBERT, M. Long-term response of forest plantation productivity and soils to a single application of municipal biosolids. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 95, p. 187–199, 2015.

PAIVA, A.V.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J.L.M.; FERRAZ, A.V. Crescimento de Mudanças de Espécies Arbóreas Nativas, Adubadas com Diferentes Doses de Lodo de Esgoto Seco e com Fertilização Mineral. **Scientia Forestalis**. v.37, n.84, p. 499-511, 2009.

PASSUELLO, A.; CADIACH, O.; PEREZ, Y.; SCHUHMACHER, M. A spatial multicriteria decision making tool to define the best agricultural areas for sewage sludge amendment. **Environment International**, v. 38, n. 1, p. 1–9, 2012.

PEREIRA, R. D.; MURASHITA, E. M.; FLUMINHAN JR., A.; Reciclagem agrícola de biosólidos: Aspectos ambientais e aceitação pública. **Colloquium Humanarum**, v. 10, n. 2, p. 90-101, 2013.

PERS - **Plano estadual de resíduos sólidos do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: SEA / INEA, 2014, 137 p.

PRITCHARD, D. L.; PENNEY, N.; MCLAUGHLIN, M. J.; RIGBY, H.; SCHWARZ, K. Land application of sewage sludge (biosolids) in Australia: risks to the environment and food crops. **Water Science & Technology**, v. 62, n.1 , p. 48 – 57, 2010.

QUINTANA, N. R. G. CARMO, M. S; MELO, W. J. Viabilidade econômica do uso do lodo de esgoto na agricultura, estudo de caso de São Paulo. **Informações econômicas**, São Paulo, v.39, n.6, p.32-36, 2009.

QUINTANA, N. R. G.; MELO, W. J.; CARMO, M. S. Rentabilidade efetiva e rentabilidade total do cultivo de milho adubado com lodo de esgoto. **Nucleus**, v. 9, n.2, p. 281 – 288, 2012.

REN, J.; LIANG, H.;DONG, L.; GAO, Z.; HE, C.; PAN, M.; SUN, L. Sustainable development of sewage sludge-to-energy in China: Barriers identification and technologies prioritization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 67, n. 10, p. 384 – 396, 2017.

ROCHA, G. N.; GONÇALVES, J. L. M.; MOURA, I. M. Mudança da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 28, n. 4, p. 623 – 639, 2004.

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

ROMEIRO, J. C. T.; GRASSI FILHO, H.; MOREIRA, L. L. Q. Absorção de N, P, K, Ca e Mg por laranjeiras “Pera” fertilizadas com lodo de esgoto compostado em substituição à adubação nitrogenada mineral. **Irriga**, v. 19, n. 1, p. 82 – 93, 2014.

SAMPAIO, T. F., GUERRINI, I. A., OTERO, X. L., VAZQUEZ, F. M., BOGIANI, J. C., OLIVEIRA, F. C., HARRISON, R. B. The Impact of Biosolid Application on Soil and Native Plants in a Degraded Brazilian Atlantic Rainforest Soil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 227, n. 1, 2016.

SAMPAIO, T. F.; GUERRINI, I. A.; BACKES, C.; HELIODORO, J. C. A.; RONCHI, H. S.; TANGANELLI, K. M.; CARVALHO, N. C.; OLIVEIRA, F. C. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.5, p. 1637-1645, 2012.

SANTOS, A. D. **Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo**. 265 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia da Construção Civil. São Paulo, 2003.

SANTOS, C. H.; GRASSI FILHO, H.; SANTOS, J. C.; PENTEADO, B. B. Fertilidade do solo e nutrição de tangerineiras ‘Ponkan’ manejados com resíduos sólidos e adubação química. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 15, n. 1, p. 75–83, 2011.

SANTOS, F. E. V.; KUNZ, S. H.; CALDEIRA, M. V. W.; AZEVEDO, C. H. S.; RANGEL, O. J. P. Características químicas de substratos formulados com lodo de esgoto para produção de mudas florestais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 9, p. 971–979, 2014.

SCHEER, M. B.; CARNEIRO, C.; BRESSAN, O. A.; SANTOS, K. G. Crescimento e nutrição de mudas de *Lafoensia pacari* com lodo de esgoto. **Floresta e Ambiente**, v. 19, p. 55-65, 2012.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; MENDONÇA, E. Cana de açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 1, p. 1 – 8, 1998.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S. & SHARMA, R.D. Alternativa agronômica para o bioossólido produzido no Distrito Federal. I – Efeito na produção de milho e adição de elementos- traço em Latossolo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 487- 495, 2002.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; LACLAU, J. P. Applying Sewage Sludge to *Eucalyptus grandis* Plantations: Effects on Biomass Production and Nutrient Cycling through Litterfall. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2011, p. 1–11, 2011.

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

SOUZA, M. L. P.; RIBEIRO, A. N.; ANDREOLI, C. V.; SOUZA, L. C. P.; BITTENCOURT, S. Aptidão das terras do Estado do Paraná para disposição final de lodo de esgoto. **Revista DAE**, v. 177, p. 20–29, 2008.

SUANON, F., TOMÉTIN, L. A. S.; DIMON, B.; AGANI, I. C.; MAMA, D.; AZANDEGBE, E. C. Utilization of sewage sludge in agricultural soil as fertilizer in the republic of Benin (West Africa): What are the risks of heavy metals contamination and spreading? **American Journal of Environmental Sciences**. v. 12, n. 1, p. 8 – 15, 2016.

TALAVERA, M. C. P.; VIRAMONTES, U. F.; CERVANTES, G. G.; IBARRA, R. J.; CASTILO, I. O. Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrientes. **Terra Latinoamericana**, v. 28, n. 4, p. 327 – 333, 2010.

TIRUNEH, A. T.; FADIRAN, A. O.; MTSHALI, J. S. Evaluation of the risk of heavy metal in sewage sludge intended for agricultural application in Swaziland. **International Journal of Environmental Sciences**, v. 5, n. 1, 2014.

TORRI, S. I.; CORRÊA, R. S.; RENELLA, G. Biosolid Application to Agricultural Land—a Contribution to Global Phosphorus Recycle: A Review. **Pedosphere**. v. 27, n. 1, p. 1 – 16, 2017.

TORRI, S. I.; CORRÊA, R. S.; RENELLA, G.; VADECANTOS, A.; PERELOMOV, L. Biosolids soil application: Why a new special on old issue?. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2012, p. 1 – 3, 2012.

TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; REIS, E. F.; SILVA, A. G. Produção de mudas de *Tectona grandis* em substratos formulados com biossólido. **Cerne**, v.20, n.2, p. 293 – 302, 2014.

VASKAN, P.; PASSUELO, A.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G.; SCHUHMACHER, M. Combined use of GIS and mixed-integer linear programming for identifying optimal agricultural areas for sewage sludge amendment: A case study of Catalonia. **Environmental Modelling and Software**, v.46, p. 163 – 169, 2013.

WALLACE, B. M., KRZIC, M., NEWMAN, R. F., FORGE, T. A., BROERSMA, K., NEILSEN, G. Soil Aggregate Dynamics and Plant Community Response after Biosolids Application in a Semiarid Grassland. **Journal of Environment Quality**. v. 45, n.5, p. 1663 – 1671, 2016.

WERLE, S.; WILK, R. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. **Renewable Energy**. v. 35, n. 9, p. 1914 – 1919, 2010.

WESTERHOFF, P., LEE, S., YANG, Y., GORDON, G. W., RISTOVSKI, K., HALDEN, R. U., HERCKES, P. Characterization, Recovery Opportunities, and Valuation of Metals in Municipal Sludges from U.S. Wastewater Treatment Plants Nationwide. **Environmental Science and Technology**, v. 49, n. 16, p. 9479–9488, 2015.

XUE, J.; KIMBERLEY, M.O.; ROSS, C.; GIELEN, G.; TREMBLAY, L.A.; CHAMPEAU, O.; HORSWELL, J.; WANG, H. Ecological Impacts of Long-Term Application of Biosolids to a Radiata Pine Plantation. **Science Total Environment.**, v. 530, p. 233-240, 2015.

YADA, M. M.; MELO, W. J.; MINGOTE, F. L. C.; MELO, V. P.; MELO, G. M. P. Chemical and biochemical properties of Oxisols after sewage sludge application for 16 years. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 30, p. 1302 – 1310, 2015.

CAPITULO I

Caracterização do lodo de esgoto gerado no Rio de Janeiro e perspectivas para reciclagem agrícola

Resumo

A coleta e tratamento do esgoto sanitário é um grave problema ambiental nas cidades brasileiras, bem como a destinação do resíduo sólido resultante desse processo, o lodo de esgoto, substância rica em matéria orgânica e nutrientes, que normalmente é descartada em aterros sanitários. O objetivo deste trabalho foi caracterizar o lodo de esgoto gerado em quatro estações de tratamento região metropolitana do Rio de Janeiro e verificar se os mesmos atendem aos critérios legais presentes na resolução CONAMA n°375/2006. O trabalho visa ainda analisar as perspectivas para a reciclagem agrícola deste material, com base na demanda potencial das principais culturas agrícolas cultivadas no estado do Rio de Janeiro. Foram analisadas amostras de oito lotes de lodo de esgoto, oriundos de quatro estações de tratamento, localizadas na região metropolitana do Rio de Janeiro, que recebem e tratam apenas esgotos domésticos, pelo sistema de lodos ativados. Para caracterização química e biológica desses lotes coletaram-se amostras representativas que foram analisadas segundo os parâmetros contidos na Resolução n° 375/2006 do CONAMA. Para analisar as perspectivas de reciclagem agrícola do lodo de esgoto no estado do Rio de Janeiro, foram levantadas as 10 culturas com maior área plantada no estado e analisadas quais destas são aptas a receberem o lodo de esgoto como fertilizante e/ou condicionador de solos. Para determinação da demanda potencial de uso do lodo de esgoto na agricultura foi levado em consideração a área ocupada no estado pelas culturas aptas a receber o lodo e multiplicado pela recomendação de adubação da cultura, considerando o lodo de esgoto como fertilizante. Os lodos analisados apresentaram elevado teor de nutrientes e matéria orgânica e enquadraram-se nos parâmetros de metais pesados, agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos estipulados pela resolução CONAMA n° 375/2006. O panorama agrícola do estado do Rio de Janeiro se mostra favorável para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto, visto que existe uma grande demanda potencial e dentre as dez culturas agrícolas com maior área plantada no estado, em oito pode-se utilizar o lodo como fertilizante ou condicionador de solos. A implementação de um Plano Estadual de reciclagem do lodo de esgoto poderia dispor este material de forma mais sustentável, além de melhorar a qualidade dos solos agrícolas e diminuir os custos com fertilizantes químicos, o que traz reflexos positivos tanto para as empresas geradoras de lodo, como para os produtores rurais.

Palavras chave: biossólido, resíduos sólidos, adubação orgânica

Abstract

Sewage collection and treatment is a serious environmental problem in Brazilian cities, as well as the disposal of the solid waste that results from this process, the sewage sludge, an substance that is rich in organic matter and nutrients and that in general is discarded in sanitary landfills. The objective of this study was to characterize the sewage sludge produced in four wastewater treatment plant in the Rio de Janeiro state and verify if the materials meet the legal parameters of the CONAMA resolution n°375/2006. The study also aimed to analyze the perspectives for agricultural recycling of the sewage sludge, based in the potential demand of the main crops cultivated in Rio de Janeiro state. It was analyzed eight lots of sewage sludge, from four different wastewater treatment plants located in the metropolitan region of Rio de Janeiro, which receive and treat only domestic sewage with the activated sludge treatment process. For chemical and biological characterization of this lots, representative samples were collected and analyzed according to the parameters of the CONAMA resolution n°375/2006. For evaluate the perspectives of agricultural recycling of the sewage sludge in Rio de Janeiro state, it was surveyed the 10 crops with the largest planted area in the state and analyzed which of them were suitable to receive the application of sewage sludge as fertilizer and/or soil conditioner. For estimating the potential demand of sewage sludge application in agriculture it was considered all the area covered with crops that are suitable for sludge application and multiplied by the fertilizing recommendation of each crop, considering the sewage sludge as the fertilizer. All the lots of sewage sludge analyzed were rich in nutrients and organic matter and meet the parameters of the CONAMA resolution n° 375/2006 for safe use, considering levels of heavy metals, pathogenic agents and bacteriological indicators. The agricultural overview of Rio de Janeiro is favorable for agricultural recycling of sewage sludge, considering that the potential demand is high, since from ten crops with the largest planted area of the state, eight are suitable for sludge application as fertilizer or soil conditioner. The implementation of a sewage sludge recycling state plan could collaborate with a more sustainable disposal of this material, also improving the quality of agricultural soils and reducing the costs with chemical fertilization, which can bring benefits both for the companies that generate the sludge and for farmers.

Key words: biosolids, solid wastes, organic fertilization

1. Introdução

As estações de tratamento de esgotos (ETEs) prestam importante serviço ambiental à sociedade, coletando e tratando diariamente milhões de litros de esgoto e desta forma, evitando que considerável carga orgânica chegue aos corpos hídricos. Após o devido tratamento, a água é devolvida aos mananciais, restando nas estações o resíduo sólido chamado lodo de esgoto (ABREU, 2017b).

No Brasil, segundo dados IBGE (2010), apenas 55% do esgoto é coletado, e destes, apenas 28% são tratados e em regiões com melhores condições de saneamento, a disposição final do resíduo do tratamento de esgotos é tema preocupante. Apenas no Estado do Rio de Janeiro são produzidos cerca de 365 toneladas de lodo de esgoto por dia, totalizando 133.225 toneladas anuais, que em quase sua totalidade são dispostos em aterros sanitários (PERS, 2014). Porém, este cenário tende a mudar, primeiramente, devido a maior conscientização ambiental da sociedade, que cobra que a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) seja devidamente cumprida, destinando os resíduos de forma mais sustentável; segundo, pela dificuldade de abertura de novos aterros sanitários e terceirização ou fechamento de aterros públicos, o que tem elevado o custo de disposição destes resíduos para as ETEs (BIELSCHOWSKY, 2014).

Este material encerra em sua composição elevados teores de nutrientes e de matéria orgânica que poderiam ser reaproveitados, aumentando a produtividade das culturas e diminuindo a dependência de fertilizantes químicos (CHIBA et al., 2008; LOBO et al., 2015; LOZADA et al., 2015). A reciclagem agrícola do lodo já está bastante difundida em alguns países como Estados Unidos, Austrália, França, Reino Unido e Espanha em que algumas regiões chegam a dispor até 80% dos lodos gerados em suas estações, para aplicações no solo (BOURIOUG et al., 2015; LU et al., 2012; MININNI et al., 2015; PRITCHARD et al., 2010). No Brasil, apesar do imenso potencial para aproveitamento agrícola, a principal forma de destinação final do lodo de esgoto ainda têm sido os aterros sanitários.

A reciclagem agrícola pode ser uma alternativa ambientalmente correta de disposição deste resíduo, com vantagens tanto para as ETEs, que passam a dispor seu resíduo de forma mais sustentável, como para os produtores rurais, que recebem de um material rico em nutrientes e matéria orgânica. No entanto, antes de implantar um programa de reciclagem do lodo de esgoto, é necessário conhecer a composição do material gerado nas ETEs e verificar se os mesmos atendem a legislação vigente, assim como, analisar se existe uma demanda regional que justifique esta alternativa.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar química e biologicamente o lodo de esgoto gerado em quatro estações de tratamento da região metropolitana do Rio de Janeiro e verificar se os mesmos atendem a resolução CONAMA nº375 / 2006 (BRASIL, 2006). Visa ainda analisar as perspectivas para a reciclagem agrícola deste material, com base na demanda potencial para atendimento das principais culturas agrícolas cultivadas no estado do Rio de Janeiro.

2. Material e Métodos

Foram analisadas amostras de oito lotes de lodo de esgoto, oriundos de quatro estações de tratamento, localizadas na região metropolitana do Rio de Janeiro, que recebem e tratam apenas esgotos domésticos, pelo sistema de lodos ativados. Estas ETEs estão sob operação e manutenção da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro, CEDAE, com as seguintes capacidades de tratamento de esgotos instaladas: ETE Alegria (5.000 l/s), ETE Barra da Tijuca (1.600 l/s), ETE Ilha do Governador (535 l/s) e ETE Sarapuí (1.500 l/s). Os lotes analisados foram: I - ETE Alegria de dezembro de 2012; II - ETE Alegria de novembro de 2014; III - ETE Barra de agosto de 2013; IV - ETE Ilha do Governador de novembro de

2014; V – ETE Ilha do Governador de fevereiro de 2015; VI – ETE Ilha do Governador de janeiro de 2016; VII - ETE Sarapuí, de agosto de 2013; e VIII – ETE Sarapuí, de novembro de 2014.

Para a caracterização e avaliação do potencial agrônomo dos lotes de lodo oriundos de diferentes ETEs, foram coletadas amostras representativas dos materiais de acordo com as normas contidas no Anexo IV da Resolução nº 375/2006 do CONAMA (BRASIL, 2006). O material foi analisado química e biologicamente de acordo com os procedimentos recomendados pela resolução.

Para determinação do N total, foi utilizado o método Kjeldahl, em que a 0,05g de amostra seca em estufa (65°C) foi diluída em 3 ml de H₂SO₄ concentrado. Logo após, a mistura foi levada ao bloco digestor a 360°C por 3 h. Para destilação, adicionou-se 20 ml de solução NaOH (10 mol L⁻¹). O N destilado foi recebido em 20 ml de solução H₃BO₃ (20 g L⁻¹), que posteriormente foi titulada com solução padronizada de H₂SO₄ (0,0025 mol L⁻¹).

Os elementos: P, K, Ca, Mg, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se e Zn foram extraídos em forno micro-ondas, através do método 3051, estabelecidos no U.S.EPA (2010) SW-846. As amostras de 0,5 g de lodo de esgoto foram secas em estufa a 65°C e misturadas em 10 mL de ácido nítrico concentrado. Após 15 minutos, as amostras foram colocadas em forno micro-ondas por 30 minutos. A determinação de K foi realizada por fotometria de chama e os demais elementos por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

A matéria orgânica foi definida a partir do teor de Carbono orgânico, que foi determinado pelo método de Walkley e Black, e depois encontrado o teor de matéria orgânica multiplicando-se esse valor pelo fator “van Bemmelen”, equivalente a 1,724 (CARMO; SILVA, 2012). O pH foi determinado usando 2 g de amostra de lodo de esgoto diluída em 20 ml de água deionizada, agitado por 5 minutos em um agitador circular horizontal, a 200 rpm. Após 30 minutos de descanso, determinou-se o pH através de pHgâmetro de bancada.

A caracterização microbiológica do biossólido quanto à presença de coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos e Salmonella sp., correspondem a presença de patógenos nocivos a saúde humana. A caracterização foi realizada de acordo com a norma U. S. – EPA *part*503 (2003), conforme estipulado pela Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006). Através de tais análises o lodo de esgoto pode ser classificado em classe A (excelente qualidade) ou B (maiores restrições de uso), dependendo da presença e ou concentrações dos microrganismos em sua composição. Os parâmetros microbiológicos e de metais pesados foram comparados com os máximos permitidos pela Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006) e avaliados se os mesmos atendem a legislação vigente relativa à aplicação de lodo no solo.

Para analisar as perspectivas de reciclagem agrícola do lodo de esgoto no estado do Rio de Janeiro, foram utilizados os dados do Acompanhamento Sistemático da Produção Agrícola, elaborado e disponibilizado pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio de Janeiro (EMATER), tendo como base o ano de 2014. Foram levantadas as 10 culturas com maior área plantada no estado do Rio de Janeiro e analisadas quais destas são aptas a receberem o lodo de esgoto como fertilizante e/ou condicionador de solos, de acordo com o artigo 12 da resolução CONAMA nº 375 / 2006. Para determinação da demanda potencial de lodo de esgoto, foi levado em consideração a área ocupada no estado pelas culturas aptas à serem fertilizadas com lodo e multiplicado pela recomendação de adubação com lodo de esgoto para cada cultura, obtida através de levantamento bibliográfico. Nos casos em que encontrou-se mais de uma recomendação, foi levado em consideração para o cálculo, a média entre as duas ou mais recomendações.

3. Resultados e Discussão

A presença de altos teores de nutrientes nos lotes de lodo de esgoto analisados (Tabela 1) corrobora os resultados observados por Aguilera et al. (2007) que caracterizou o lodo de três estações de tratamento de esgotos do Chile; Mtshali et al. (2014) analisando lodo de sete ETEs em Swaziland, na África Austral e Carvalho et al. (2015) que analisaram cinco diferentes lodos provenientes de duas ETEs do estado de São Paulo, Brasil. Estes autores, assim como no presente estudo, encontraram altos teores de matéria orgânica e nutrientes no lodo de esgoto, principalmente N e P. Sampaio (2010) analisando lodos produzidos em diferentes ETEs do Brasil, encontrou teores de N variando entre 22,5 a 55,3g kg⁻¹, para P os teores variaram de 6 a 30 g kg⁻¹, para K de 0,1 a 3,9g kg⁻¹ e para a matéria orgânica os teores variaram de 410 a 713 g kg⁻¹. Assim, pode-se inferir que de forma geral os lodos analisados enquadram-se nos padrões observados para lodos gerados em estações do Brasil.

Tabela 1. Teores de nutrientes e matéria orgânica (g kg⁻¹) presentes em lotes de lodo de estações de tratamento de esgotos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, RJ

ETE	Lote	N	P	K	Ca	Mg	MO	pH
Alegria	I	38,83	6,16	5,00	2,36	0,15	544,1	5,5
Alegria	II	32,94	9,56	3,99	2,11	5,45	572,8	5,1
Barra	III	18,37	8,91	2,09	2,39	5,69	398,3	7,3
Ilha	IV	33,47	5,42	1,82	1,56	3,22	578,8	5,3
Ilha	V	28,78	5,22	1,57	1,74	3,22	589,4	5,0
Ilha	VI	14,24	5,53	4,01	18,51	5,83	598,7	6,5
Sarapuí	VII	42,33	17,23	2,73	1,35	2,95	515,9	6,3
Sarapuí	VIII	39,81	12,24	3,07	8,59	2,69	513,2	6,5
Média		31,09	8,78	3,03	4,83	3,65	538,9	5,8
Desvio padrão		10,17	4,24	1,21	6,01	1,93	65,3	0,9

N – método Kjeldhal; P, Ca e Mg – ICP-OES; K – fotometria de chama; MO – método de Walkley e Black; pH – H₂O.

Vale ressaltar, que a diferença na concentração de nutrientes entre os lodos está ligada não apenas a composição do esgoto gerado na bacia de esgotamento, mas também no tipo de tratamento empregado em cada ETE. A ETE Barra da Tijuca, por exemplo, possui tratamento em nível primário, o que segundo Bielschosky (2014), tende a gerar lodos com menores concentrações de nutrientes do que o produzido em estações com tratamento a nível secundário, como é o caso dos demais lodos analisados neste trabalho. Outro fato observado foi a variabilidade do teor de N no lodo oriundo da ETE Ilha do governador, acredita-se que isso tenha ocorrido em função do método de secagem através de leitos semipermeáveis a céu aberto, o que pode ter favorecido percolação e a volatilização do N quando o mesmo permanece por longos períodos em processo de secagem.

Os lotes de lodo de esgoto analisados apresentaram níveis elevados de N, sendo o macronutriente em maior abundância, variando de 14,24 a 42,33 g kg⁻¹ de lodo de esgoto na base seca (Tabela 1). Carvalho et al. (2015) analisando cinco diferentes lodos, oriundos de ETEs de São Paulo, encontraram teores de N semelhantes, que variaram de 17,40 a 42,63 g kg⁻¹ na base seca. No lodo de esgoto, a maior parcela de N encontra-se na forma orgânica e, portanto, fica prontamente disponível para as plantas somente após a degradação da matéria orgânica (CARVALHO et al., 2015; NASCIMENTO, 2016). Essa característica faz com que

o N presente no lodo de esgoto seja liberado lentamente para o sistema, o que pode ser favorável em comparação com fertilizantes químicos. Considerando-se que existe uma forte dependência nacional da importação desse nutriente e custos relativamente altos para aquisição do mesmo, a reciclagem do lodo e conseqüentemente do N contido nele, pode surgir não apenas como uma estratégia do ponto de vista ambiental, mas também com relevante interesse estratégico e econômico (ANDRADE et al., 2010).

Chiba et al. (2008), ao analisar a necessidade de complementar o lodo de esgoto com adubos nitrogenados para fertilização de cana de açúcar, encontraram resultados que comprovam a eficiência do lodo na fertilização desta cultura. Estes autores verificaram que a dose de lodo correspondente a 120 kg ha⁻¹ de N total (10,8 t), foram suficientes para suprir a necessidade da cultura de cana de açúcar, sem complementação com outras fontes nitrogenadas. Levando-se em consideração que a cana de açúcar é a cultura agrícola mais cultivada no Rio de Janeiro, correspondendo a aproximadamente 49% de toda a área agrícola plantada no Estado (EMATER, 2014), o reaproveitamento do lodo para fertilização desta cultura, pode ser uma alternativa estratégica para o setor agrícola do estado..

O teor de P nos lotes de lodo analisados variou de 5,22 até 17,23 g kg⁻¹, valores próximos aos observados em outros estudos (CARVALHO et al., 2015; CONSUEGRA et al., 2015; MACHADO; TRANNIN, 2015; SAMPAIO, 2010). Os lotes de lodo oriundos da ETE Ilha do Governador apresentaram os menores teores de P, já os maiores teores deste nutriente foram encontrados nos lodos da ETE Sarapuú. A reciclagem do lodo de esgoto para reaproveitamento do P possui elevado potencial econômico e ambiental, visto que, este é um elemento essencial para todos os organismos vivos, fundamental na fertilização da produção de alimentos, e que, se seguir o ritmo atual de exploração e uso do P, a estimativa é que suas reservas no mundo durem apenas mais 50 a 100 anos (MARTÍNEZ et al., 2014).

Em solos de clima tropical e subtropical, como no Brasil, a dependência das adubações fosfatadas é ainda mais acentuada, pois o P encontra-se fortemente adsorvido nos minerais de argila dos solos, sendo muito baixa a sua disponibilidade para as plantas, necessitando da aplicação de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados, que em sua grande maioria são importados custo relativamente alto (ANDRADE et al., 2010; MACHADO et al., 2011). A tendência é que os adubos fosfatados fiquem cada vez mais caros, visto que há evidente decréscimo da quantidade e qualidade das rochas fosfáticas no mundo, o que leva há necessidade urgente de buscar novas fontes e desenvolver métodos sustentáveis para a reciclagem deste elemento, principalmente através do lodo de esgoto (EGLE et al., 2015; MARTÍNEZ et al., 2014).

Potássio é um elemento altamente solúvel e por isso apresenta-se em concentrações menores nos lodos de esgoto seco, pois devido à alta solubilidade, este nutriente é diluído e fica solubilizado na água residuária (BERTON; NOGUEIRA, 2010). Os lodos analisados apresentaram teores de K que variaram de 1,82 a 5,00 g kg⁻¹, valores próximos aos observados por Nascimento (2016), que analisando lodos provenientes de 19 ETEs do estado de São Paulo, encontrou teores de K variando de 0,50 a 4,60 g kg⁻¹. Fuentes et al. (2010); Mtshali et al. (2014) e Suhadolc et al. (2010) também alertam para os baixos teores de K encontrados em lodos de esgoto, desta forma, para reciclagem agrícola, dependendo da necessidade da cultura, é necessário enriquecer a composição do lodo com fontes de K.

Cálcio foi encontrado em teores que variaram de 1,35 a 18,51 g kg⁻¹ de lodo na base seca. Como nas ETEs estudadas não é adotado o tratamento de caleação para higienização do lodo, justifica-se estes teores mais baixos de Ca nos lodos analisados, do que o encontrado por outros autores (CARVALHO et al., 2015; CONSUEGRA et al., 2015; NASCIMENTO, 2016). O lote VI, correspondente ao lodo da ETE Ilha do Governador analisado em janeiro de 2016, apresentou teor de Ca superior às demais amostras, o que pode ser resultado de alguma fonte pontual deste nutriente na bacia de esgotamento durante este período. Em menor

magnitude o lote VI, da ETE de Sarapu . A maior concentra o de Ca, pode ter contribuído para eleva o do pH, o que conseqentemente pode ter facilitado a volatiliza o do N, que apresentou teor inferior ao observado nos outros dois lotes oriundos da ETE Ilha do Governador.

Os teores de Mg encontrados nos lotes analisados variaram de 0,15 a 5,83 g kg⁻¹. Nascimento (2016) ao analisar a composi o química de lodos oriundos de 19 ETES do Estado de São Paulo, encontrou teores de Mg variando de 1,0 a 4,5 g kg⁻¹. Este   um elemento que está presente no lodo essencialmente na forma mineral, ou seja, inorgânica, e mesmo dosagens pequenas de lodo de esgoto podem suprir as necessidades desse nutriente, dependendo da demanda da cultura (TSUTIYA, 2001).

Os lodos analisados apresentaram teores de matéria orgânica, variando de 51,6 a 57,9%. O elevado teor de matéria orgânica nos lodos gerados nas esta es de tratamento de esgoto   um dos principais atributos a serem levados em considera o para a reciclagem agrícola deste material, visto que em muitas áreas, principalmente de forma o de povoamentos florestais, são pobres em matéria orgânica. Carvalho et al. (2015) ao analisarem a fra o orgânica de cinco diferentes lodos, encontraram que mais de 70% do carbono e 80% do nitrogênio, encontram-se no compartimento orgânico dos lodos de esgoto. Por esse motivo, o lodo tem sido amplamente utilizado como condicionador para melhoria das características químicas e físicas dos solos, inclusive sua aplica o no solo tem sido indicada como uma das a es para mitiga o das mudanças climáticas, visando aumentar o estoque de matéria orgânica e conseqentemente de carbono no solo (BONINI et al., 2015; OUMET et al., 2015).

A aplica o de lodo de esgoto   uma alternativa benéfica para reciclar matéria orgânica e nutrientes, pois melhora as características físicas, químicas e propriedades biológicas dos solos, além de melhorar o estabelecimento da vegeta o em ambientes degradados e auxiliar na nutri o de culturas agrícolas (BORGES et al., 2009; LOBO et al., 2015; LU et al., 2012; SAMPAIO et al., 2012; SAMPAIO et al., 2016). No entanto, para que o lodo de esgoto esteja apto a ser aplicado em planta es agrícolas,   necessário que além de suprir a necessidade nutricional das plantas e melhorar as características do solo, ele atenda aos princípios de segurança ambiental, contendo teores seguros de metais pesados e não oferecendo risco químico ou microbiológico para a saúde humana ou meio ambiente.

Verifica-se que para todos os lotes de lodo de esgoto analisados, as concentra es dos metais pesados foram menores que o máximo permitido pela legisla o, caracterizando-os como viáveis para o aproveitamento agrícola, no que se refere ao risco de contamina o por metais pesados (Tabela 2). Tiruneh et al. (2014) analisaram a composi o química do lodo de esgoto de sete esta es de tratamento da Su a e encontraram maiores concentra es de metais pesados nos lodos de esta es que recebem esgoto industrial. Como os lodos analisados no presente trabalho são oriundos de esta es que recebem apenas cargas domiciliares, justificam-se os baixos teores de metais pesados encontrados.

Tabela 2. Teores de metais pesados (mg kg^{-1}) potencialmente tóxicos em lotes de lodo de estações de tratamento de esgotos da região metropolitana do Rio de Janeiro – RJ

ETE	Lote	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Se	Zn
Alegria	I	2,6	157	0,20	70,1	267	0,03	40,2	197	5,9	681
Alegria	II	0,004	406	1,83	80,2	272	0,01	26,9	152	0,004	586
Barra	III	0,004	180	1,01	66,2	193	0,09	36,4	34	0,004	1007
Ilha	IV	3,65	182	1,29	42,7	240	0,02	16,2	71	0,004	675
Ilha	V	0,004	159	1,01	40,1	204	0,01	14,9	61	0,004	619
Ilha	VI	0,004	139	0,89	39,0	277	0,01	13,2	64	0,004	1079
Sarapuí	VII	0,004	567	0,99	55,3	117	0,01	11,1	39	0,004	366
Sarapuí	VII	0,004	41,1	0,19	20,3	23	0,01	11,2	6	0,004	43
Conama	-	41	1300	39	1000	1500	17	420	300	100	2800
Média	-	0,8	228,9	0,9	51,7	199,1	0,02	21,3	78,0	0,74	632,0
DesvPad.	-	1,47	170,6	0,54	19,7	89,0	0,03	11,7	64,2	2,08	330,5

*Valores máximos de metais pesados presentes no lodo, permitidos pela Resolução CONAMA n° 375 / 2006.

Os lotes I e II, provenientes da ETE Alegria, são os que despertam maior atenção, pois, embora os teores de Pb estejam abaixo do limite estipulado pela legislação (300 mg.kg^{-1}), os mesmos representam respectivamente, à 66 e 51% do limite máximo. Tendo em vista que as ETEs analisadas admitem receber apenas esgotos domiciliares, estes níveis de Pb podem indicar descargas clandestinas na rede coletora, visto que, os níveis observados para estas duas amostras, assemelham-se mais aos teores observados em lodos de ETEs que recebem cargas industriais, do que aquelas exclusivamente domiciliares (PINHEIRO; SÍGOLO, 2007; TIRUNEH et al., 2014).

Analisando-se a concentração média de metais pesados nos lotes amostrados, em relação aos teores máximos permitidos pela Resolução CONAMA n° 375/2006, a ordem de atenção foi $\text{Pb} > \text{Zn} > \text{Ba} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Se} > \text{Hg}$, que encontram-se respectivamente a 26, 23, 18, 13, 5, 5, 2, 2, 1 e 0,1% do limite máximo para utilização agrícola. A concentração abaixo dos limites máximos permitidos, não necessariamente eliminam os riscos de contaminação, visto que sucessivas aplicações podem levar ao acúmulo destes metais no solo agrícola (FJÄLLBORG et al., 2005).

Andrade et al. (2014) ao analisarem os teores de metais pesados em dois Latossolos cultivados com milho, que receberam 13 aplicações anuais de 5, 10 e 20 t ha^{-1} de lodo de esgoto, encontraram um acréscimo no teor de metais pesados na camada superficial do solo e apesar dos teores estarem abaixo do valor de investigação no solo, determinado pela Resolução Conama n° 420 / 2009 (BRASIL, 2009), os autores alertam que se continuado as aplicações, o teor de metais atingirá o nível de toxicidade destes solos. Sendo assim, a reciclagem do lodo de esgoto para culturas agrícolas que necessitam de aplicações sucessivas, necessita de monitoramento periódico, para evitar efeitos negativos.

Outro parâmetro importante trata-se da análise dos agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos, que é utilizada para identificar possíveis riscos de contaminação microbiológica e qualificar o lodo de esgoto em Classe A ou B. De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, todos os lodos amostrados podem ser classificados como de classe A, indicando que a concentração de microrganismos patogênicos nestes materiais está abaixo da máxima permitida, atendendo as normas da Resolução n° 375/2006 do CONAMA.

Tabela 3. Concentração de microrganismos patogênicos em lotes de lodo de estações de tratamento de esgotos da região metropolitana do Rio de Janeiro, RJ

ETE	Lote	Coliformes	Ovos Viáveis de	<i>Salmonellasp.</i>
		Termotolerantes	Helmintos	
		NMP g ⁻¹ ST	Ovos g ⁻¹ ST	Presente/ausente em 10g ST
Alegria	I	< 0,04	< 0,01	Ausente
Alegria	II	< 0,04	< 0,01	Ausente
Barra	III	< 0,04	< 0,01	Ausente
Ilha	IV	13,62	< 0,01	Ausente
Ilha	V	7,29	< 0,01	Ausente
Ilha	VI	< 0,04	< 0,01	Ausente
Sarapuí	VII	< 0,04	< 0,01	Ausente
Sarapuí	VIII	< 0,04	< 0,01	Ausente
CONAMA*	-	< 1000	< 0,25	Ausente

*valores máximos permitidos pela resolução CONAMA n° 375/2006.

Para o aproveitamento do lodo de esgoto em áreas agrícolas e florestais, é necessário que o mesmo passe pelo processo de estabilização para redução de patógenos, eliminação do potencial de atração de vetores e geração de odores (BRASIL, 2006). Os lodos das ETES Alegria e Ilha do Governador passam pelo processo de digestão anaeróbica para estabilização, já os lodos das ETES Barra e Sarapuí utilizam o processo de tratamento térmico, expondo o lodo a altas temperaturas durante determinado período de tempo. Com base nos resultados, pode-se inferir que ambos os processos estão sendo eficientes para a estabilização dos lodos analisados, visto que, todos se situaram abaixo dos limites máximos exigidos.

Os padrões microbiológicos da Classe A são exatamente os mesmos fixados pela legislação norte americana, sendo este padrão, mundialmente aceito como forma de promover a necessária segurança à saúde pública da população exposta. Apesar da legislação brasileira aceitar os mesmos parâmetros adotados mundialmente, a mesma, faz severas restrições em relação à aplicação do lodo classe A, mesmo não existindo qualquer estudo técnico científico que a justifique (SAMPAIO, 2010). As legislações dos Estados Unidos e da Austrália não impõem restrições de uso para lodos enquadrados na Classe A, sendo inclusive, comercializados para uso doméstico, em alguns supermercados nos EUA (SAMPAIO, 2010). No Brasil, segundo a Resolução CONAMA 375/2006 (BRASIL, 2006), é expressamente proibido o uso de qualquer tipo de lodo de esgoto em culturas cuja parte comestível da planta fica em contato com o solo, cultivo de raízes e tubérculos, além de algumas restrições em relação a olerícolas e pastagens

Os lotes de lodos analisados além de apresentarem alto potencial nutricional para aproveitamento agrícola, adequaram-se a legislação vigente quanto aos níveis de metais pesados e contaminantes biológicos. É importante salientar que conforme pode ser observada pelos dados apresentados, a composição do lodo de esgoto possui certa variabilidade de uma ETE para outra, principalmente em função da bacia de esgotamento, da forma de tratamento e do método de redução de patógenos aplicado.

Na Tabela 4 são apresentadas as 10 culturas agrícolas mais plantadas no estado do Rio de Janeiro, que representam 83% de toda a área plantada e 64,5% do faturamento agrícola anual (EMATER, 2014). Destas, apenas aipim e alface não poderiam ser adubados com lodo de esgoto, tendo em vista o disposto no artigo 12 da resolução CONAMA n° 375 (BRASIL,

2006), que proíbe a aplicação em culturas cuja parte comestível fique em contato direto com o solo. As demais culturas são estrategicamente importantes para futuras ações de reciclagem de lodo de esgoto, pois apresentam uma demanda potencial de 2.902.943 toneladas de lodo de esgoto, o que corresponde a aproximadamente 22 vezes a produção anual de lodo de esgoto de todo o estado (PERS, 2014), ou seja, todo o lodo de esgoto gerado atualmente pelas ETEs do estado atenderia a apenas 4,59% da demanda potencial para estas oito culturas agrícolas.

Tabela 4. Demanda potencial de lodo de esgoto para atendimento das 10 culturas com maior área plantada no estado do Rio de Janeiro

Culturas	Área (ha)	*Recomendação (t ha ⁻¹)	Recomendação média (t ha ⁻¹)	Demanda potencial (t)	Referências
Cana de açúcar	85.562	10,8 – 42,0	22,75	1.946.535	Chiba et al. 2009; Franco et al 2010; Silva et. al (1998)
Banana	14.604	9,0 – 52,0	31,40	458.565	Barbosa, 2008; Coelho et al., 2011; Fortes, 2011; Melo; Ligo, 2006
Café	12.344	9,0 - 11,5	10,25	126.526	Gonçalves, 2005; Martins et al., 2005
Aipim	8.292	-	-	0	Brasil, 2006
Laranja	7.212	10,8 – 40,0	18,36	132.412	Canet et al., 1997; Lambert, 2013; Lanza, 2014; Romeiro, 2012; Romeiro et al., 2014;
Alface	4.497	-	-	0	Brasil, 2006
Coco verde	3.613	12,87	12,87	46.499	Estimado com base na demanda de N pela cultura
Milho	2.932	26 – 75	46,50	136.338	Gomes et al., 2007; Junio et al., 2011; Junio et al., 2013; Quintana et al., 2012;
Abacaxi	2.629	8,80	8,80	23.135	Maia, 2013
Tomate	2.579	12,77	12,77	32.933	Dantas, 2010
Total	144.264	-	-	2.902.943	-

*maior e menor recomendação encontrada na bibliografia.

Observa-se pela Tabela 4, que para as culturas cana de açúcar, banana, laranja e milho, houve maiores diferenças entre a maior e a menor recomendação de lodo de esgoto por hectare encontrado na literatura, o que pode ser creditado principalmente a pesquisas realizadas em condições diferentes de clima, solos, materiais genéticos, metodologias de pesquisa, e principalmente lodos diferentes, com diferentes teores de nutrientes, o que influencia diretamente na recomendação para atendimento da demanda nutricional da cultura.

Embora o lodo de esgoto possua um elevado potencial para reciclagem agrícola, é necessário identificar os locais de maior potencial e aprofundar os estudos de logística, para

verificar a viabilidade do transporte até estas áreas. Bittencourt et al. (2014), ao analisar o programa de reciclagem de lodo de esgoto no estado do Paraná, observaram que a distância entre a ETE e as áreas de aplicação variaram de 32 a 213 km, demonstrando que pode-se trabalhar a nível regional, visto que normalmente os maiores geradores de lodo não são os municípios com maiores produções agrícolas.

As regiões norte e noroeste do estado do Rio de Janeiro são regiões com elevada relevância agrícola, responsáveis por 63% de toda a área agrícola plantada do estado, onde se localiza mais de 94% da área plantada com cana de açúcar, quase 99% da área plantada de abacaxi, 83% da área plantada com café e 49% da área ocupada por coco verde no estado (EMATER, 2014). Na região norte, destacam-se os municípios de Campos dos Goytacazes, São Francisco do Itabapoana e Quissamã, com a produção de cana de açúcar, abacaxi e coco verde. Já na região noroeste, municípios de Porciúncula, Varre-sai e Bom Jesus do Itabapoana destacam-se na produção de café, milho e cana de açúcar (EMATER, 2014). Estas culturas poderiam facilmente absorver todo o lodo de esgoto gerado nas grandes cidades da região, como Campos dos Goytacazes, Macaé e Itaperuna, sem necessidade de grandes deslocamentos, visto que possuem vastas áreas agrícolas cultivadas com espécies aptas à fertilização com lodo de esgoto. Alguns estudos evidenciam vantagens da fertilização destas culturas com lodo de esgoto, como melhoria da qualidade do solo, ganhos em produtividade, menor dependência de fertilizantes químicos, diminuição dos custos de produção, dentre outros (CHIBA et al. 2009; FRANCO et al., 2014; JUNIO et al., 2013; MAIA, 2013; MARTINS et al., 2005; YADA et al., 2015). A reciclagem do lodo de esgoto nestas áreas agrícolas pode representar uma considerável economia com fertilizantes químicos, proporcionando benefícios econômicos, ambientais e sociais. Chiba et al. (2008) e Franco et al (2010) analisaram a eficiência do lodo de esgoto na fertilização da cana de açúcar e concluíram que o lodo pode suprir até 100% da necessidade de adubos nitrogenados. Sendo a cana de açúcar a principal cultura agrícola do estado do Rio de Janeiro, a utilização do lodo de esgoto como fertilizante deve ser tratado como um assunto estratégico para o setor agrícola fluminense.

Outra região tradicionalmente agrícola é a região serrana, reconhecidamente grande produtora de hortaliças e responsável por mais de 90% da produção de alface no estado (EMATER, 2014). Dentre as oito culturas analisadas que são aptas a receberem o lodo de esgoto, destacam-se nesta região o cultivo de banana, café, tomate e milho, que juntas somam aproximadamente 6.390 ha (EMATER, 2014). Além destas culturas, a reciclagem de lodo de esgoto poderia atender também os produtores rurais que praticam a agricultura migratória com sistema de pousio, nesta região.

O sistema de pousio pode ser definido como uma forma de agricultura marcada pela rotação de pequenas áreas de cultivo, por períodos curtos (2 a 4 anos), alternados com períodos maiores de descanso (5 a 10 anos) e tem grande representação histórica e cultural na região serrana fluminense (SILVA, 1996). Neste modelo, o tempo de pousio tem influência na sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, pois períodos longos de pousio para recuperação da fertilidade do solo podem inviabilizar o sistema, visto que demandaria maiores áreas de produção e aumento de custos referentes a limpeza do terreno (CORREIA et al., 2004). O lodo de esgoto poderia ser aplicado ao final do ciclo de produção, como condicionador, acelerando a recuperação das características químicas e físicas do solo durante o período de pousio, principalmente o aporte de matéria orgânica, que é tido como um dos principais indicadores de qualidade neste sistema (BENITES et al. 2010). Com um menor tempo de pousio, é possível otimizar a área de produção sem a necessidade de suprimir novas áreas de floresta. Pela legislação, solos tratados com lodo de esgoto podem receber quaisquer culturas após 48 meses, e como o tempo de pousio varia de 5 a 10 anos, não haveria restrições de uso da terra após o período de recuperação (BRASIL, 2006).

A região metropolitana do Rio de Janeiro é extremamente importante para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto, pois é onde encontra-se a maior densidade populacional do estado e conseqüentemente é o maior potencial de geração de lodo de esgoto. Dentre as oito culturas analisadas, destacam-se nesta região os cultivos de banana e laranja, principalmente nos municípios de Itaguaí, Paracambi, Seropédica, Tanguá e Rio Bonito (EMATER, 2014). Estes cinco municípios estão localizados a menos de 90 km da cidade do Rio de Janeiro e possuem juntos, mais de 6.000 ha cultivados apenas com banana e laranja, o que os credencia com grande potencial para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto gerado na região metropolitana. A reciclagem do lodo de esgoto nestas áreas poderia trazer benefícios tanto para as empresas de saneamento, que diminuiriam seus custos de disposição final e estariam dispostos a receber seus resíduos de forma mais sustentável, como também para os produtores rurais, que poderiam aumentar sua produção e diminuir seus custos com insumos. Bittencourt et al. (2014) analisaram a reciclagem agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná, que contemplou de 2007 a 2010 mais de 2.200 hectares de áreas agrícolas e concluíram que os 80 produtores participantes do programa de reciclagem economizaram em média U\$\$ 813,45 ha⁻¹, em aquisição de fertilizantes e condicionadores de solo.

Na região das baixadas litorâneas, os municípios de Araruama, Silva Jardim, Cabo Frio e Saquarema são importantes produtores de laranja, banana, cana de açúcar e coco verde, as principais culturas da região, que juntas somam 8.746 ha plantados nestes quatro municípios (EMATER, 2014). Já a região da costa verde tem papel de destaque na produção de banana, principalmente o município de Mangaratiba, responsável por quase 33% da área plantada com banana no estado. Ambas as regiões poderiam utilizar nas áreas agrícolas os lodos gerados em suas cidades e ainda absorver lodo da região metropolitana, visto a proximidade destas com a cidade do Rio de Janeiro.

As regiões centro sul fluminense e médio Paraíba já foram grandes produtoras agrícolas, principalmente durante o ciclo do café, porém, atualmente possuem juntas apenas 2,12% da área agrícola plantada no estado do Rio de Janeiro (EMATER, 2014). Na região centro sul, as maiores áreas cultivadas são de tomate, em Paty do Alferes e Vassouras. Já na região médio Paraíba destacam-se a cultura de banana em Piraí e da cana de açúcar em Rio Claro e Valença. Cidades de maior porte, mas sem grandes áreas agrícolas, como Resende e Volta Redonda, poderiam utilizar a reciclagem do lodo de esgoto em parceria com os municípios menores, que possuem maiores áreas agrícolas, mas não geram grandes quantidades de lodo.

Além dos benefícios econômicos, a reciclagem agrícola de lodo de esgoto acarreta também benefícios ambientais, como a minimização de gases do efeito estufa, tanto pela redução de uso de fertilizantes químicos, como pelo aumento do estoque de carbono no solo, o aumento da diversidade biológica nos solos, o reaproveitamento de nutrientes, principalmente N e P, além da diminuição da disposição destes resíduos em aterros sanitários, aumentando a vida útil destes locais (LOZADA et al. 2015; OUIOMET et al. 2015).

Vale ressaltar ainda, que para garantir estes benefícios ambientais, as restrições locais contidas no artigo 15 da resolução CONAMA n° 375 devem ser respeitadas, minimizando assim os riscos ao meio ambiente e a saúde humana (BRASIL, 2006). Neste sentido, necessita-se de estudos mais aprofundados que busquem demarcar espacialmente as áreas aptas a aplicação de lodo de esgoto e identifiquem o uso e ocupação da terra nestes locais, o que renderia mais dados para subsidiar os planos de reciclagem.

4. Conclusões

Os lodos analisados apresentaram elevado teor de nutrientes e de matéria orgânica, e enquadraram-se nos parâmetros de metais pesados, agentes patogênicos e indicadores

bacteriológicos estipulados pela resolução CONAMA nº 375/2006. Todos os lodos analisados foram classificados como “classe A”, com atributos favoráveis para a reciclagem agrícola.

O panorama agrícola do estado do Rio de Janeiro se mostra favorável para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto, visto que existe uma grande demanda potencial e dentre as dez culturas agrícolas com maior área plantada no estado, em oito pode-se utilizar o lodo como fertilizante ou condicionador de solos. A implementação de um Plano Estadual de reciclagem do lodo de esgoto poderia dispor este material de forma mais sustentável, além de melhorar a qualidade dos solos agrícolas e diminuir os custos com fertilizantes químicos, o que traz reflexos positivos tanto para as empresas geradoras de lodo, como para os produtores rurais.

5. Referências

ABREU, A. H.M., LELES, P. S. S., ALONSO, J. M., ABEL, E. L. S., OLIVEIRA, R. R. Characterization of sewage sludge generated in Rio de Janeiro , Brazil , and perspectives for agricultural recycling, **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4, p. 2433 – 2448, 2017.

AGUILERA, S. M., BORIE, G., PEIRANO, P., RODRIGUEZ, M., GREZ, I., ZUNINO, H. Chemical characterization of sewage sludges in Chile and their potential utilization as amendment to reclaim soils for forestation purposes. **Chemosphere**. v. 30, n. 10, p. 1993 – 2003, 2007.

ANDRADE, C. A.; BOEIRA, R. C.; PIRES, A. M. M. Nitrogênio presente em lodo de esgoto e a resolução nº 375 do CONAMA. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, 19 A. M. M. (Org.). **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após resolução nº 375 do CONAMA**. Botucatu: FEPAF, 2010. p.157-170.

ANDRADE, M. G.; LIMA, A. S. T.; MELO, W. J.; SANTOS, E. J. HERRMANN, A. B. Elementos-traço em dois latossolos após aplicações anuais de lodo de esgoto por treze anos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 135 – 148, 2014.

BARBOSA, R. D. **Manejo de solo com lodo de esgoto em bananeira irrigada**. 2008, 101 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu.

BENITES, M. V.; MOUTTA, R. O.; COUTINHO, H. L. C.; BALIEIRO, F. C. Análise discriminante de solos sob diferentes usos em área de mata atlântica a partir de atributos da matéria orgânica. **Revista Árvore**, v. 34, n. 1, p. 685 – 690, 2010.

BERTON, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R. **Uso de lodo de esgoto na agricultura**. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T.A.R.; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto - Avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA**. 2010, Botucatu: FEPAF, 2010, p. 31-50.

BIELSCHOWSKY, M. C. **Modelo de Gerenciamento de Lodo de Estação de Tratamento de Esgotos: Aplicação do Caso da Bacia da Baía de Guanabara**. 2014, 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; GOMES, D. Sewage sludge usage in agriculture: a case study of its destination in the Curitiba Metropolitan REGION, Paraná, Brazil. **Water Air and Soil Pollution**, v. 225, p.1 – 8, 2014.

BONINI, C.S.B. ; ALVES, M.C ; MONTANARI, R. Lodo de Esgoto e Adubação Mineral na Recuperação de Atributos Químicos de Solo Degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.4, p. 388-393, 2015.

BORGES, T. A.; SILVA, C. M.; BALDUÍNO, A. P. C.; SOARES, J. A.; PEREIRA, C. E. B. Uso de lodo de esgoto na recuperação de área degradada no Distrito Federal. **Revista AIDIS**, v. 2, n. 1, p. 65 – 75, 2009.

BOURIOUG, M.; GIMBERT, F.; ALAOUI-SEHMER, L. BENBRAHIM, M.; ALEYA, L.; SOSSÉ, B. A. Sewage sludge application in a plantation: Effects on trace metal transfer in soil – plant – snail continuum. **Science of the Total Environment**, v. 503, p. 309-314, 2015.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 02 de Agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução – CONAMA. Resolução no 375/2006**. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n. 167, p. 141-146, 30 ago 2006.

CANET, R.; POMARES, F.; TARAZONA, F. Chemical extractability and availability of heavy metals after seven years application of organic wastes to a citrus soil. **Soil Use and Management**, v. 13, p. 117-121, 1997.

CARVALHO, C. S; RIBEIRINHO, V. S.; ANDRADE, C. A.; GRUTZMACHER, P.; PIRES, A. M. M. Composição Química da Matéria Orgânica de Lodos de Esgoto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.10, n.3, p. 413-419, 2015.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. Cultivo de cana de açúcar em Argissolo tratado com lodo de esgoto. I – disponibilidade de nitrogênio no solo e componentes de produção. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, v. 32, p. 643 - 652, 2008.

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. Rendimento de cana de açúcar cultivada em Argissolo, utilizando lodo de esgoto como fonte de fósforo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 495 – 501, 2009.

COELHO, H. A.; GRASSI FILHO, H.; ROMEIRO, J. C. T.; POMPERMAYER, G. V.; BARBOSA, R. D.; LOBO, T. F. Desempenho agrônômico do lodo de esgoto como fonte de nitrogênio em bananeiras. **Revista Agrarian**, v. 4, n. 13, p. 172 – 181, 2011.

CONSUEGRA, S. B. M.; NAVARRO, F. J. G.; VILLAJOS, J. A. A. O.; REYES, C. P.; HIGUERAS, P.L. Effect of the addition of sewage sludge as a fertilizer on a sandy vineyard soil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 23, n. 2, p. 151 – 157, 2015.

CORREIA, M. E. F.; REIS, L. L.; CAMPELLO, E. F. C.; FRANCO, A. A. **Populações da macrofauna do solo em agricultura itinerante na região da Mata Atlântica, RJ**. 62-75 pp. In: CAMPELLO, E. F. C. (ed.). Seminário sobre Agricultura Migratória na Região Serrana do Rio de Janeiro. Seropédica: EMBRAPA-Agrobiologia, 2004; 86p

DANTAS, J. D. M. **Uso de lodo de esgoto como fonte alternativa de nitrogênio para o cultivo do tomateiro cereja (*Lycopersicum esculentum* sp.)**. 2010, 68 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Sergipe – São Cristovão.

EGLE, L.; RECHBERGER, H.; ZESSNER, M. Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater Resources, Conservation and recycling. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.016>> Acesso em 21 de junho de 2016.

EMATER – EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO RIO DE JANEIRO - **Acompanhamento Sistemático da Produção Agrícola, Ano 2014**. Disponível em <http://www.emater.rj.gov.br/images/ASPA2014_MUN_SITE.htm> Acesso em 24 de maio 2016.

FJÄLLBORG, B. et al. Identification of metal toxicity in sewage sludge leachate. **Environment International**, v.31, n.1, p.25-31, 2005.

FORTES, F. C. A. **Manejo do solo com lodo de esgoto na produção e qualidade de frutos em bananeira irrigada**. 2011, 127 f. Tese (Doutorado em agronomia) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu.

FRANCO, O.; SOTO, A.; LÓPEZ. L. Recuperación del fósforo presente em el biosólido después de ser sometido a un tratamiento térmico. **Dyna Energía y Sostenibilidad**, v. 59, p. 1 – 12, 2010.

FUENTES, D.; VALDECANTOS, A.; LLOVET, J.; CORTINA, J.; VALLEJO, V. R. Fine-tuning of sewage sludge application to promote the establishment of *Pinus halepensis* seedlings. **Ecological engineering**, v.36, p. 1213 – 1221, 2010.

GOMES, S. B. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; BIONDI, C. M. Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 5, p. 459 – 465, 2007.

GONÇALVES, F. T. A. **Dinâmica do nitrogênio em solo tratado com lodo de esgoto e cultivado com café**. 2005, 73 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais) – Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.

JUNIO, G. R. Z.; SAMPAIO, R. A.; NASCIMENTO, A. L.; SANTOS, G. S.; SANTOS, L. D. T.; FERNANDES, L. A. Produtividade de milho adubado com composto de lodo de esgoto e fosfato natural de gafsa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 706 – 712, 2013.

JUNIO, G. R. Z.; SAMPAIO, R. A.; SANTOS, G. B.; NASCIMENTO, A. L.; PRATES, F. B. S.; FERNANDES, L. A. Metais pesados em milho fertilizado com fosfato natural e composto de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1082 – 1088, 2011.

LAMBERT, R. A. **Eficiência do uso de água residuária e de lodo de esgoto compostado nas propriedades químicas e físicas de solo cultivados com laranjeiras**. 2013, 92 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu.

LANZA, M. H. **Utilização de lodo de esgoto compostado e irrigação com água residuária em laranjeiras ‘valência’**. 2014 – 78 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu.

LOBO, T. F.; FILHO, H. G.; BULL, L. T.; SOUZA, F. L. P. Efeito do Nitrogênio e do Lodo de Esgoto na Nutrição do Feijoeiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.10, n.2, p.33-41, 2015.

LOZADA, P. T.; LEAL, J. A. S.; OROBIO, B. A. P.; CASTRO, V. C. PARRA, C. A. M. Influencia de La aplicación de biosólidos sobre el suelo, la morfología y productividad del cultivo de caña de azúcar. **Revista U.D.C.A. Act.& Div. Cient.**, v. 18, n. 1, p. 69 – 79, 2015.

LU, Q.; HE, Z. L.; STOFFELLA, P. J. Land Application of Biosolids in the USA: a Review. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2012, p. 1 - 11, 2012.

MACHADO, L. R. D.; TRANNIN, I. C. B. Agricultural potential of na industrial sewage sludge in compliance with CONAMA Resolution nº 375/2006. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 6, p. 4177 – 4184, 2015.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E.; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. **Bioscience Journal**, v. 27, n.1, p. 70-76, 2011.

MAIA, F. G. **Efeito da adubação com lodo de esgoto nas características químicas do solo, desenvolvimento vegetativo, produtividade e qualidade de frutos de abacaxizeiro cv. Vitória**. 2013, 64 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo – Vitória

MARTINEZ, A. A.; GEA, G.; ARAUZO, J.; KERSTEN, S. R. A.; KOOTSTRA, A. M. J. Phosphorus recovery from sewage sludge char ash. **Biomass e Bioenergy**, v.65, p.42-50, 2014.

MARTINS, D. R.; CAMARGO, O. A.; BATAGLIA, O. C. Qualidade do grão e da bebida em cafeeiros tratados com lodo de esgoto. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 1, p. 115 – 126, 2005.

MELO, L. A. S.; LIGO, M. A. V. Uso de lodo de esgoto em bananicultura: efeitos de doses no primeiro ano de aplicação. **Revista Cientiae Rural**, v. 11, n. 2, p. 33 – 38, 2006.

MININNI, G.; BLANCH, A. R.; LUCENA, F.; BERSELLI, S. EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. **Environmental Science Pollution. Res**, v. 22, p. 7361 – 7374, 2015.

MTSHALI, J. S.; TIRUNEH, A. T.; FADIRAN, A. O.; Characterization of Sewage Sludge Generated From Wastewater Treatment Plants in Swaziland in Relation to Agricultural Uses. **Resources and Environment**, v..4, p.190-199, 2014.

NASCIMENTO, A. L. **Caracterização microbiológica, química e presença de poluentes orgânicos em amostras de lodo de esgoto de São Paulo**. 2016, 88 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

OUIMET, R.; PION, A. P.; HÉBERT, M. Long-term response of forest plantation productivity and soils to a single application of municipal biosolids. **Canadian Journal Soil Science**, v. 95, p. 187 – 199, 2015.

PERS - **Plano estadual de resíduos sólidos do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: SEA / INEA, 2014, 137 p.

PINHEIRO, C. H. R.; SÍGOLO, J. B. Metais pesados e elementos associados do lodo de esgoto da ETE Barueri – Região metropolitana de São Paulo diante do fator sazonalidade. **Geochimica Brasiliensis**, v. 21, n, 2, p. 148 – 164, 2007.

PRITCHARD, D. L.; PENNEY, N.; MCLAUGHLIN, M. J.; RIGBY, H.; SCHWARZ, K. Land application of sewage sludge (biosolids) in Australia: risks to the environment and food crops. **Water Science & Technology**, v. 62, n.1 , p. 48 – 57, 2010.

QUINTANA, N. R. G.; MELO, W. J.; CARMO, M. S. Rentabilidade efetiva e rentabilidade total do cultivo de milho adubado com lodo de esgoto. **Nucleus**, v. 9, n.2, p. 281 – 288, 2012.

ROMEIRO, J. C. T. **Atributos químicos do solo e crescimento de laranjeiras para irrigadas com efluentes de esgoto tratado e fertilizadas com lodo de esgoto compostado**. 2012, 145 f. Tese (doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu.

ROMEIRO, J. C. T.; GRASSI FILHO, H.; MOREIRA, L. L. Q. Absorção de N, P, K, Ca e Mg por laranjeiras “Pera” fertilizadas com lodo de esgoto compostado em substituição à adubação nitrogenada mineral. **Irriga**, v. 19, n. 1, p. 82 – 93, 2014.

SAMPAIO, A. O. Adequação das estações de tratamento de esgotos sanitários à resolução número 375 do CONAMA In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA**. Botucatu: FEPAF, 2010., p. 265-278.

SAMPAIO, T. F., GUERRINI, I. A., OTERO, X. L., VAZQUEZ, F. M., BOGIANI, J. C., OLIVEIRA, F. C., HARRISON, R. B. The Impact of Biosolid Application on Soil and Native Plants in a Degraded Brazilian Atlantic Rainforest Soil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 227, n. 1, 2016.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; MENDONÇA, E. Cana de açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 1, p. 1 – 8, 1998.

SILVA, L. F. **Solos Tropicais: aspectos pedológicos, ecológicos e de manejo**. Ed: Terra Brasilis/ SP; 1996.

SUHADOLC, M.; SCHOLL, R.; HANG, A.; DORFLER, U.; SCHLOTTER, M.; LOBNIK, F. Single Application on of Sewage Sludge- Impact on The Quality of an Alluvial Agricultural Soil. **Chemosphere**, v..81, p. 1536-1543, 2010.

TIRUNEH, A. T.; FADIRAN, A. O.; MTSHALI, J. S. Evaluation of the risk of heavy metal in sewage sludge intended for agricultural application in Swaziland. **International Journal of Environmental Sciences**, v. 5, n. 1, 2014.

TSUTIYA, M. T. **Biossólidos na Agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001, 113 p.

YADA, M. M.; MELO, W. J.; MINGOTE, F. L. C.; MELO, V. P.; MELO, G. M. P. Chemical and biochemical properties of Oxisols after sewage sludge application for 16 years. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 30, p. 1302 – 1310, 2015.

CAPITULO II

Valoração econômica e ambiental dos lodos gerados em ETEs no Rio de Janeiro e viabilidade logística da reciclagem

Resumo

O lodo de esgoto possui elevados teores de nutrientes e de matéria orgânica, sendo sua reciclagem agrícola uma alternativa viável de destinação. O objetivo deste trabalho é calcular o valor agregado do lodo gerado em estações de tratamento de esgotos (ETE) do estado do Rio de Janeiro e inferir sobre suas perspectivas de reciclagem agrícola. Foram analisadas amostras de oito lotes de lodo, oriundos de quatro ETEs na região metropolitana do Rio de Janeiro. A valoração econômica foi feita por meio do método de mercado de bens substitutos, utilizando preços de fertilizantes consolidados no mercado, sendo eles uréia, superfosfato simples e cloreto de potássio. A partir do preço desses fertilizantes verificou-se os valores de R\$ 3,65/kg de N, R\$ 13,00/kg de P e R\$ 2,52/kg de K. Para a matéria orgânica foi considerado valor de R\$ 0,30/kg. O cálculo do valor agregado considerou tais preços e os teores de nutrientes e matéria orgânica observados nos diferentes lotes de lodo. Constatou-se que o valor agregado médio dos lodos de esgoto variou entre R\$ 252,56 a R\$ 390,84 / t, dependendo do método aplicado. O alto valor agregado observado reforça a necessidade de disposição mais sustentável do lodo de esgoto. A reciclagem agrícola pode ser vantajosa tanto para empresas de saneamento, como para produtores rurais, trazendo benefícios econômicos, sociais e ambientais.

Palavras chave: biossólido, fertilizante orgânico e resíduos sólidos.

Abstract

The sewage sludge has high levels of nutrients and organic matter and its agricultural recycling is a viable alternative for its disposal. The objective of this paper is to calculate the added value of the sludge generated in wastewater treatment plants (WTP) of the state of Rio de Janeiro, discussing about its agricultural recycling potential. There were analyzed eight samples from four different WTP of the metropolitan region of Rio de Janeiro state. The economic valuation was done through the market price method, using prices of chemical fertilizers consolidated in the market, namely urea, simple superphosphate and potassium chloride. Considering the price of these fertilizers, the value obtained for each nutrient was of R\$ 3,45/kg for N, R\$13,00/kg for P and R\$ 2,52/kg for K. For organic matter it was considered a value of R\$0,30/kg. The calculation of the added value considered these prices and the nutrient and organic matter contents observed in the different samples of sludge. It was found that the added value of sewage sludge ranged from R\$ 252,56/t to R\$ 390,84/t, depending on the methodology used. The high added value observed indicate the need for a more sustainable disposal of sewage sludge. Agricultural recycling can be beneficial to both sanitation companies and rural producers, bringing economic, social and environmental benefits.

Key words: biosolids, organic fertilizer and solid wastes.

1. INTRODUÇÃO

As estações de tratamento de esgotos (ETEs) prestam importante serviço ambiental à sociedade, coletando e tratando diariamente milhões de litros de esgoto e, desta forma, evitando que considerável carga orgânica chegue aos corpos hídricos. Após o devido tratamento, a água é devolvida aos mananciais, restando nas estações um resíduo sólido chamado lodo de esgoto.

O lodo de esgoto devidamente tratado e estabilizado (biossólido) pode ser utilizado como condicionador de solos e fertilizante, melhorando as características químicas, físicas e biológicas dos solos (LU et al., 2012; CHRISTODOULOU; STAMATELATOU, 2016). No Brasil, estes lodos são em sua maioria dispostos em aterros sanitários, o que representa um contrassenso, visto que em geral os solos brasileiros são altamente intemperizados e possuem baixos teores de matéria orgânica e nutrientes, tornando a produção agrícola altamente dependente do uso de fertilizantes químicos, na maior parte importados a um alto custo (ANDRADE et al., 2010; MACHADO et al., 2011).

A reciclagem agrícola do lodo de esgoto é, portanto, uma forma lógica de fechar o ciclo dos nutrientes entre o campo e a cidade. Ademais, é uma alternativa mais sustentável que o despejo desse material em aterros sanitários e que o uso de adubos químicos, cujas jazidas de nutrientes são finitas como as de P e K (MARTÍNEZ et al., 2014; FRANCO et al., 2014; BITTENCOURT et al., 2014; YADA et al., 2015). No entanto, a reciclagem agrícola do lodo de esgoto ainda é muito incipiente no Brasil, principalmente em estados com menor tradição agrícola, como o Rio de Janeiro (ANDREOLI et al., 2008).

A valoração do lodo de esgoto, além de revelar o potencial deste material como fonte de nutrientes e matéria orgânica, chama a atenção de produtores rurais e empresas de saneamento, abrindo oportunidades e possibilidades para a elaboração de políticas públicas que incentivem a reciclagem deste material. Uma das metodologias mais utilizadas para valoração de resíduos é o método de mercado de bens substitutos, que utiliza o preço de produtos que já estão consolidados no mercado, como comparação com o material que se quer valorar (GHAZY et al. 2009; QUINTANA et al., 2009; MARCON, et al., 2015).

Dentre os principais argumentos utilizados pelos geradores de lodo para não investir na reciclagem, está a logística até o produtor, visto que em geral as ETE's estão localizadas em ambiente urbano, enquanto os produtores nas zonas rurais. Para avaliar a viabilidade da reciclagem florestal, é essencial que seja analisado a distância máxima viável para reciclagem do lodo.

O objetivo deste trabalho foi calcular o valor agregado em N, P, K e matéria orgânica no lodo gerado em estações de tratamento de esgotos localizadas na região metropolitana do Rio de Janeiro e inferir sobre as perspectivas de reciclagem agrícola no estado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Valoração com base no potencial fertilizador

A valoração econômica do lodo de esgoto foi realizada através do método de mercado de bens substitutos (Quintana et al., 2009), que utilizou as concentrações dos principais nutrientes e da matéria orgânica contida no lodo em comparação com preços de fertilizantes e fontes de matéria orgânica cujos mercados já estão consolidados.

Foram contemplados dois cenários para a valoração. No primeiro, denominado “valor agregado total”, utilizou-se a metodologia de Ghazy et al. (2009), onde considera-se o valor de 100% dos teores de N, P, K e matéria orgânica que compõem o lodo de esgoto, o que representaria o máximo valor que poderia ser pago pelo lodo de esgoto em relação ao teor de nutrientes e matéria orgânica.

No segundo cenário, denominado “valor agregado efetivo”, foi adaptada a metodologia proposta por Sullivan et al. (2007), a qual considera que os nutrientes contidos

no lodo de esgoto encontram-se essencialmente na forma orgânica. Esta metodologia entende que o valor do lodo de esgoto se limita à quantidade de nutrientes que estará prontamente disponível para as culturas de interesse de ciclo curto. Portanto, considera-se para o cálculo apenas a parte mineralizável no primeiro ano, de N e P, bem como 100% do K e da matéria orgânica. Sendo assim, considera-se que no primeiro ano após a aplicação, apenas 35% do N e 40% do P são mineralizados e disponibilizados para as plantas, enquanto que o restante permanece no solo em processo de mineralização, possivelmente numa velocidade menor. Dessa forma, dependendo do ciclo de vida da cultura, parte dos nutrientes presentes no lodo não seriam completamente aproveitados pelas plantas.

Foram analisadas amostras de oito lotes de lodo de esgoto, oriundos de quatro estações de tratamento, localizadas na região metropolitana do Rio de Janeiro, que recebem e tratam apenas esgotos domésticos. Estas ETEs estão sob operação e manutenção da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro, CEDAE, e possuem os seguintes processos de tratamento: ETE Alegria (5.000 l/s) e ETE Ilha do Governador (535 l/s), tratamento secundário com sistema de lodos ativados, estabilização biológica anaeróbica, desaguamento por centrifuga e secagem realizada em leitos semipermeáveis; ETE Sarapuí (1.500 l/s) tratamento secundário com sistema de lodos ativados, desaguamento por centrifuga e secagem térmica; e ETE Barra da Tijuca (1.600 l/s), tratamento primário, com desaguamento por centrifugas e secagem térmica.

A CEDAE possui um projeto interno de reciclagem de lodo de esgoto para produção de mudas florestais da Mata Atlântica em seus viveiros florestais, portanto, os lotes analisados coincidiram com a necessidade de análises pelo projeto da Companhia. Os lotes analisados foram: I - ETE Alegria de dezembro de 2012; II – ETE Alegria de novembro de 2014; III - ETE Barra de agosto de 2013; IV - ETE Ilha do Governador de novembro de 2014; V – ETE Ilha do Governador de fevereiro de 2015; VI – ETE Ilha do Governador de janeiro de 2016; VII - ETE Sarapuí, de agosto de 2013; e VIII – ETE Sarapuí, de novembro de 2014.

Para a caracterização e avaliação do potencial agrônômico dos lotes de lodo oriundos de diferentes ETEs, foram coletadas amostras representativas dos materiais de acordo com as normas contidas no Anexo IV da Resolução nº 375/2006 do CONAMA (Brasil, 2006). O material foi analisado química e biologicamente de acordo com os procedimentos recomendados pela resolução.

Para determinação do N total, foi utilizado o método Kjeldahl, em que a 0,05g de amostra seca em estufa (65°C) foi diluída em 3 ml de H₂SO₄ concentrado. Logo após, a mistura foi levada ao bloco digestor a 360°C por 3 h. Para destilação, adicionou-se 20 ml de solução NaOH (10 mol L⁻¹). O N destilado foi recebido em 20 ml de solução H₃BO₃ (20 g L⁻¹), que posteriormente foi titulada com solução padronizada de H₂SO₄ (0,0025 mol L⁻¹).

Os teores de P e K foram extraídos conforme U.S.EPA (2010), método 3051, SW-846. As amostras de 0,5 g de lodo de esgoto foram secas em estufa a 65°C e misturadas em 10 ml de ácido nítrico concentrado. Após 15 minutos, as amostras foram colocadas em forno microondas por 30 minutos. A determinação de K foi realizada por fotometria de chama e do P por espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). O teor de carbono orgânico foi determinado pelo método de Walkley e Black e o de matéria orgânica (MO) multiplicando-se o valor do teor de carbono orgânico pelo fator “van Bemmelen”, equivalente a 1,724 (CARMO; SILVA, 2012).

Os insumos cotados no mercado como fonte de nutrientes foram a uréia, o superfosfato simples e o cloreto de potássio, por serem fertilizantes químicos amplamente utilizados no fornecimento de N, P e K, respectivamente. Os custos por tonelada dos fertilizantes industrializados, assim como da matéria orgânica, foram extraídos dos dados disponibilizados pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017), através da média entre os preços de janeiro de 2016 a dezembro de 2017.

Para os cálculos foram considerados os percentuais de N, P e K em cada fertilizante (Tabela 1). Foi necessário converter com base no peso atômico de cada elemento químico os percentuais P₂O₅ e K₂O para teores de P e K puros naquele determinado fertilizante. Determinou-se o teor de P no fertilizante, dividindo-se o teor de P₂O₅ por 2,29, já o teor de K no fertilizante foi obtido dividindo-se o teor de K₂O por 1,2. Para o N não foi necessário essa transformação, pois os fabricantes já informam o teor total de N.

Tabela 1: Preço de fertilizantes e matéria orgânica, praticados no mercado, de janeiro de 2016 a dezembro 2017 de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento

Fertilizante Químico	Teor (Compostos)	Teor (nutrientes)	Preço da t do fertilizante*	Preço do kg do nutriente
Uréia	45% N	45,0% N	R\$ 1.554,40	R\$ 3,45
Superfosfato simples	18% P ₂ O ₅	7,9% P	R\$ 1.026,70	R\$ 13,00
Cloreto de Potássio	58% K ₂ O	48,2% K	R\$ 1.464,40	R\$ 2,52
Matéria orgânica	100% MO	100,0% MO	R\$ 300,00	R\$ 0,30

Através da equação 1 foi calculado o valor agregado em nutrientes e matéria orgânica pela metodologia da valoração total do lodo de esgoto (Ghazy et al., 2009) e, pela equação 2, calculou-se a valoração efetiva (Sullivan et al., 2007):

$$V^{\text{total}} = (P^{\text{N}} \times Q^{\text{N}}) + (P^{\text{P}} \times Q^{\text{P}}) + (P^{\text{K}} \times Q^{\text{K}}) + (P^{\text{MO}} \times Q^{\text{MO}}) \quad (1)$$

$$V^{\text{efetiva}} = [(P^{\text{N}} \times Q^{\text{N}}) \times 0,35] + [(P^{\text{P}} \times Q^{\text{P}}) \times 0,40] + (P^{\text{K}} \times Q^{\text{K}}) + (P^{\text{MO}} \times Q^{\text{MO}}) \quad (2)$$

Em que, V^{total} e V^{efetiva} correspondem ao valor agregado total e efetivo do lodo (R\$ t⁻¹), respectivamente; P^{N} , P^{P} , P^{K} e P^{MO} são os preços da tonelada de N, P, K e matéria orgânica, respectivamente; Q^{N} , Q^{P} , Q^{K} e Q^{MO} são as quantidades de N, P, K e matéria orgânica presentes por tonelada de lodo, respectivamente, e 0,35 e 0,40 são as constantes de mineralização do N orgânico e do P orgânico presentes no lodo no primeiro ano após a aplicação, respectivamente.

Através das equações 1 e 2 foram determinados o valor agregado por tonelada de lodo de esgoto correspondente aos oito lotes oriundos das quatro ETE's da região metropolitana do Rio de Janeiro, de acordo com as duas metodologias empregadas. Foram levantados ainda, dados oficiais da produção de lodo de esgoto no estado do Rio de Janeiro e realizadas estimativas e extrapolações sobre o potencial de reciclagem deste material no estado. Para esta parte do trabalho foi considerado o valor médio observado através da valoração total, visto que considera o teor total de N, P e K contidos no lodo de esgoto.

Para comparação dos resultados com pesquisas científicas realizadas em outros períodos, os valores foram atualizados pela inflação do período de referência dos artigos até dezembro de 2017, levando-se em consideração o IGP – DI (Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna), que é medido pela Fundação Getúlio Vargas e registra a inflação de preços desde matérias-primas agrícolas e industriais até bens e serviços finais. Já para os artigos em que os valores estavam em dólares, foi levado em consideração a cotação de U\$\$ 1,00 = R\$ 3,29 - média da cotação do dólar americano no mês de dezembro de 2017.

2.2. Distância viável de transporte

Como geralmente as estações de tratamento de esgotos não comercializam este material, e sim disponibilizam gratuitamente para os produtores rurais que se disponham a utilizá-lo, foram considerados dois cenários para definição da logística de reciclagem. No primeiro, o custo de transporte seria custeado pela ETE geradora, e no segundo, o transporte seria de responsabilidade dos produtores rurais que utilizarem o resíduo.

2.2.1. Distância máxima eficiente de transporte subsidiado pela ETE geradora

Utilizando uma adaptação de SILVA et al. (2002), a equação (2) a seguir procura estabelecer para a geradora, até que distância de transporte é interessante arcar com os custos de frete em detrimento ao custo que a ETE já possui de disposição deste resíduo em um aterro sanitário. Para tanto,

$$D_{g \rightarrow p} = \left(\frac{\text{Custo de disposição final}}{\text{Custo do transporte}} \right) \div 2 \quad (2)$$

Em que:

$D_{g \rightarrow p}$ = Distância (Km) viável da geradora de lodo ao produtor;

Custo de disposição final = Custo (R\$. t^{-1}) para disposição do lodo em aterro sanitário;

Custo de transporte = Custo unitário do transporte (R\$. t^{-1} . km^{-1}).

Divide-se o resultado por 2, pois deve-se levar em consideração a ida e a volta do caminhão até a propriedade onde será entregue o lodo de esgoto.

Para determinação do preço de disposição do lodo de esgoto em aterros sanitários, foi considerado o valor de R\$160,00 t^{-1} , praticado pelo Centro de Tratamento de Resíduos de Seropédica-RJ (Aterro sanitário de Seropédica), no período de 2015. Foi levado em consideração especificamente o custo de disposição neste aterro, pois, este será o provável destino de todo o lodo gerado na região metropolitana do Rio de Janeiro após o fechamento do aterro público de Gericinó (BIELSCHOWSKY, 2014). Para o custo de transporte (Ct), foi considerado o valor de mercado determinado pela planilha da Empresa de Obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro (EMOP, 2014), de 0,44 R\$. t^{-1} . km^{-1} , que considera a utilização de caminhão basculante com capacidade de 12 toneladas e velocidade média de 50 $km \cdot h^{-1}$.

2.2.2. Distância máxima eficiente de transporte subsidiado pelo produtor rural

Neste cenário, adota-se a premissa de que, para que haja vantagem da reciclagem para o produtor rural, o valor total dos nutrientes e matéria orgânica contidos em uma massa definida do lodo de esgoto, deve ser igual ou superior ao custo do frete para seu transporte entre a ETE geradora e o local de utilização.

Partindo deste princípio, a distância de viabilidade econômica para o transporte foi calculada através da Equação (3).

$$DMV \leq \left(\frac{\text{Valor agregado ao lodo de esgoto}}{\text{Custo de transporte}} \right) \div 2 \quad (3)$$

Em que:

DMV = distância máxima viável em quilômetros (km) do produtor até o gerador;

Valor agregado ao lodo de esgoto = valor (R\$. t^{-1}) agregado em nutrientes e matéria orgânica ao lodo de esgoto destinado a reciclagem;

Custo do transporte = Custo unitário do transporte (R\$. t^{-1} . km^{-1}).

Divide-se o resultado por 2, pois deve-se levar em consideração a ida e a volta do caminhão até o local onde será utilizado o lodo de esgoto.

O valor agregado ao lodo de esgoto foi determinado de acordo com a Equação (1), levando-se em consideração os nutrientes e matéria orgânica contidos por tonelada de lodo de esgoto. Para o custo de transporte até o produtor, também foi considerado o valor de 0,44 R\$. $t^{-1} \cdot km^{-1}$, da tabela EMOP.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Valoração com base no potencial fertilizador

Observa-se que os lodos da ETE Sarapuú foram os que apresentaram maior valor agregado total em comparação aos demais, alcançando até R\$ 531,81 t^{-1} em matéria orgânica e nutrientes (Tabela 2). Os menores valores foram encontrados no lote III, correspondente ao lodo coletado em agosto de 2013 na ETE Barra da Tijuca, que apresentou R\$ 304,02 t^{-1} e no lote VI, coletado em janeiro de 2016 na ETE Ilha do Governador, com valor agregado de R\$ 310,24 t^{-1} . Em média, os lodos de esgoto apresentaram valor agregado de R\$ 390,84 por tonelada.

Tabela 2: Conteúdo e valor agregado total de nutrientes e matéria orgânica por tonelada, em lotes de lodo de quatro estações de tratamento de esgotos da região metropolitana do Rio de Janeiro

ETE	Nutrientes no lodo ($kg t^{-1}$)				Valoração total ($R\$ t^{-1}$)				
	N	P	K	MO	N	P	K	MO	Total
Alegria I	38,83	6,16	5,00	544,1	134,13	80,06	12,62	163,23	390,04
Alegria II	32,94	9,56	4,00	572,8	113,78	124,25	10,10	171,84	419,96
Barra I	18,37	8,91	2,09	398,3	63,45	115,80	5,28	119,49	304,02
Ilha I	33,47	5,42	1,82	578,8	115,61	70,44	4,59	173,64	364,29
Ilha II	28,78	5,22	1,57	589,4	99,41	67,84	3,96	176,82	348,04
Ilha III	14,20	5,50	4,00	598,7	49,05	71,48	10,10	179,61	310,24
Sarapuú I	42,33	17,23	2,73	515,9	146,22	223,93	6,89	154,77	531,81
Sarapuú II	39,81	12,24	3,07	513,2	137,51	159,08	7,75	153,96	458,30
Média	31,09	8,78	3,03	538,9	107,40	114,11	7,66	161,67	390,84
Desv. Pad.	10,17	4,24	1,21	65,3	35,12	55,05	3,07	19,59	77,31

Quintana et al. (2009) calcularam o valor agregado em NPK do lodo gerado na ETE Barueri - SP em R\$ 282,89 por tonelada do produto. Lemainski; Silva (2006) verificaram valor agregado em NPK de R\$ 273,97 t^{-1} para o lodo de esgoto produzido pela ETE Brasília Norte - DF. Estes valores atualizados pela inflação do período de referência dos artigos até dezembro de 2017, levando-se em consideração o índice IGP-DI, correspondem a R\$ 555,58 e R\$ 622,05 t^{-1} respectivamente. Estes valores encontram-se acima do valor agregado médio observado para os oito lotes de lodo de esgoto analisados neste trabalho. Deve-se considerar ainda que os autores de ambos os trabalhos não levaram em consideração o valor agregado da matéria orgânica, que como se pode observar pela Tabela 2, é um dos componentes que mais agrega valor ao lodo de esgoto.

Ghazy et et al. (2009), analisando as perspectivas sustentáveis de utilização do lodo gerado no Egito, em ETEs do Cairo e Alexandria, também realizaram a valoração total do lodo de esgoto pelo método de bens substitutos e encontraram valor agregado em NPK e MO de U\$\$ 53,00 t^{-1} ou R\$ 174,37 t^{-1} , quando levado em consideração o preço subsidiado dos fertilizantes pelo governo Egípcio. Já quando os autores consideram o preço dos fertilizantes sem o subsidio dado pelo governo local, o lodo atingiu o valor agregado de U\$\$ 118,53 ou R\$ 389,96 t^{-1} , valor próximo ao encontrado neste trabalho.

A variabilidade dos valores encontrados entre os lodos, tanto no presente trabalho, como na bibliografia, revela as diferenças existentes na composição deste material, que podem ser oriundas da bacia de esgotamento, nível de tratamento, método de estabilização, entre outros. O lodo da ETE Ilha, por exemplo, apresentou alta variabilidade entre os três lotes analisados, o que pode ser creditado ao método de secagem e estabilização em leitos semipermeáveis a céu aberto, que favorece a lixiviação e volatilização do N em função das variáveis climáticas e do tempo de permanência do lodo no leito.

Constata-se pela Tabela 2, que a matéria orgânica é o componente que mais contribui para a valoração do lodo de esgoto, representando em média 41% do valor agregado. O fósforo representou em média 29% do valor agregado e o nitrogênio 28%. Em função do baixo teor encontrado na composição do lodo de esgoto, o K correspondeu em média a apenas 2% do valor agregado. Fuentes et al. (2010), Suhadolc et al. (2010) e Mitshali et al. (2014) também encontraram baixos teores de K em lodos de esgoto, o que ocorre em função da alta solubilidade deste nutriente. Sendo assim, para reciclagem agrícola, dependendo da exigência da cultura, torna-se necessário enriquecer a composição do lodo com fertilizantes que forneçam K.

Como os nutrientes contidos no lodo de esgoto encontram-se em sua maioria na forma orgânica, não sendo prontamente liberados para as plantas, alguns autores consideram que a valoração desse material deve levar em consideração apenas a parte mineralizável de N e P durante o ciclo de produção da cultura explorada (MARCON et al., 2015; SULLIVAN et al., 2007). Na Tabela 3 verifica-se que o valor agregado médio pelo método da valoração efetiva, é de 252,56 t⁻¹, valor 35% menor que na valoração total.

Tabela 3: Conteúdo disponível e valor agregado efetivo de nutrientes e matéria orgânica por tonelada, na base seca, em lotes de lodo de quatro estações de tratamento de esgotos da região metropolitana do Rio de Janeiro

ETE	*Nutrientes disponíveis no lodo (kg t ⁻¹)				Valoração efetiva (R\$ t ⁻¹)				
	N	P	K	MO	N	P	K	MO	Total
Alegria I	13,59	2,46	5,00	544,10	46,94	32,02	12,62	163,23	254,82
Alegria II	11,53	3,82	4,00	572,80	39,82	49,70	10,10	171,84	271,46
Barra I	6,43	3,56	2,09	398,30	22,21	46,32	5,28	119,49	193,29
Ilha I	11,72	2,17	1,82	578,80	40,46	28,18	4,59	173,64	246,87
Ilha II	10,07	2,09	1,57	589,40	34,79	27,14	3,96	176,82	242,71
Ilha III	4,97	2,20	4,00	598,70	17,17	28,59	10,10	179,61	235,47
Sarapuí I	14,82	6,89	2,73	515,90	51,18	89,57	6,89	154,77	302,41
Sarapuí II	13,93	4,90	3,07	513,20	48,13	63,63	7,75	153,96	273,47
Média	10,88	3,51	3,03	538,90	37,59	45,64	7,66	161,67	252,56
Desv. Pad.	3,56	1,69	1,21	65,30	12,29	22,02	3,07	19,59	32,11

*Considerou-se 35% do N total; 40% do P total e 100% do K e matéria orgânica.

Marcon et. al. (2015) também utilizaram a valoração efetiva ao analisar o valor agregado em N, P, K, Ca e Mg de 10 lotes de lodo de esgoto produzidos pela UGL Ouro Verde, localizada em Foz do Iguaçu – PR. Porém, consideraram apenas 20% do teor de N como disponível para as plantas e encontraram valores entre R\$ 36,72 t⁻¹ e R\$ 167,32 t⁻¹, o que corresponde em valores atualizados de R\$ 45,31 t⁻¹ a R\$ 206,48 t⁻¹, valores abaixo dos encontrados no presente trabalho. Apesar dos autores também terem considerado o valor fertilizante do Ca e Mg, o que se justifica pelo maior teor destes nutrientes em lodos tratados e

higienizados através da adição de cal, os mesmos não consideraram o valor da matéria orgânica, que, como observado na Tabela 3, possui grande representatividade no valor agregado total.

A matéria orgânica contribui positivamente para manter a capacidade produtiva dos solos e melhora suas características físicas, como porosidade, agregação das partículas, densidade aparente, além de constituir uma reserva de nutrientes para as plantas e microrganismos (PÉREZ et al., 2007; BONINI et al., 2015). Tendo em vista os benefícios oriundos da matéria orgânica e pelo fato dos solos tropicais brasileiros serem altamente intemperizados, contendo baixos teores deste componente, a valoração da matéria orgânica contida no lodo de esgoto não deve ser ignorada. Mesmo que o interesse principal seja os nutrientes, o fornecimento dos mesmos está intrinsecamente ligado a qualidade da matéria orgânica, o que justifica os bons resultados encontrados em pesquisas com diferentes culturas em adubações feitas com lodo de esgoto comparadas à fertilização química (LEMAINSKI; SILVA, 2006; FRANCO et al., 2010; LOBO et al., 2012; NASCIMENTO et al., 2013; LOZADA et al., 2015)

Franco et al. (2010) constataram que a adubação com lodo de esgoto aumentou a produtividade da cultura de cana de açúcar em relação a adubação com NPK convencional, em que, a dose de 10,8 t. ha⁻¹, reduziu em 100% a necessidade de adubação química de N, e em 30% a necessidade de P₂O₅, com aumento de produtividade de colmos de 22% em relação a adubação convencional. Considerando que a cana de açúcar é a principal cultura agrícola do estado do Rio de Janeiro, correspondendo a 49% de toda a área agrícola plantada (EMATER, 2014), a reciclagem do lodo de esgoto como fertilizante e condicionador de solo pode ser estratégico para o setor sucroalcooleiro fluminense.

Em função do teor de matéria orgânica e das funções da mesma, a aplicação de lodo de esgoto combinada com doses complementares de fertilizantes químicos pode ser mais efetiva que a adoção de um ou outro método separadamente. Llorens et. al. (2012) ao analisarem a fertilização com lodo de esgoto na cultura de tomate “Montecarlo”, concluíram que através da fertilização combinada é possível reduzir em 40, 56 e 44% o consumo de N, P e K advindo de fertilizantes químicos. Os autores constataram que a substituição parcial da adubação química pelo lodo de esgoto não afetou o crescimento e a produtividade das plantas, e não resultou em acúmulos de metais nos frutos, sendo viável economicamente e seguro ambientalmente.

A metodologia de valoração efetiva considera que apenas 35% do N e 45% do P ficarão disponíveis para as plantas no primeiro ano após a aplicação e o restante ficará no solo e será liberado lentamente ao longo do tempo (SULLIVAN et al., 2007). A valoração apenas desta parcela mineralizável no primeiro ano, parece lógica em uma visão de curto prazo, no entanto, os nutrientes que não forem aproveitados neste primeiro momento após a aplicação, continuarão no solo e estarão disponíveis para as culturas subsequentes. Desta forma, a valoração efetiva pode ser uma metodologia que acaba subvalorizando o lodo de esgoto.

Carvalho et al. (2015) ao analisar a composição química da matéria orgânica de lodos oriundos de diferentes tratamentos, observaram que de 58 a 74% do fósforo presente nestes materiais estavam na fração inorgânica, portanto, disponíveis para as plantas no momento da aplicação. Bousselhaj et al. (2004) analisando a mineralização no nitrogênio contido no lodo de esgoto após aplicação no solo, concluíram que após 140 dias a taxa de mineralização do N foi em média de 38,6%. Estes resultados corroboram a tese de subvalorização do lodo de esgoto pelo método da valoração efetiva, que considera apenas 45% do P e 35% do N como mineralizável no primeiro ano. Deve-se considerar ainda, que a taxa de mineralização destes nutrientes é altamente variável em função das doses de lodo de esgoto aplicadas, da qualidade do material orgânico presente no resíduo e do tipo de solo e das condições climáticas (MORETTI et al., 2013).

Embora N e P sejam os nutrientes tipicamente com maiores concentrações encontrados nos lodos de esgoto, não necessariamente são os mais valiosos, a extração de micronutrientes e metais raros, pode ser outra alternativa para agregar valor ao lodo de esgoto. Westerhoff et al. (2015) analisaram a concentração de 58 elementos químicos presentes nos lodos de esgoto de 94 ETEs dos EUA e com base nos seus valores de mercado determinaram o valor potencial destes lodos. Os autores concluíram que os elementos analisados conferem valor agregado médio de U\$\$ 460,00 t⁻¹ (R\$ 1.513,40 t⁻¹) de lodo de esgoto, sendo que ouro e prata corresponderam a 20% deste valor agregado. Dentre os elementos analisados, os autores identificaram 13 mais valiosos, que foram Ag, Cu, Au, P, Fe, Pd, Mn, Zn, Ir, Al, Cd, Ti, Ga, e Cr, que juntos conferem valor agregado médio de U\$\$ 280,00 t⁻¹ (R\$ 921,20 t⁻¹) de lodo de esgoto.

É gerado diariamente nas ETEs do Estado do Rio de Janeiro, aproximadamente 365 toneladas de lodo de esgoto. Em um ano a produção deste resíduo no Estado atinge 133.225 toneladas (PERS, 2014). Fazendo-se uma extrapolação dos teores médios de N, P, K e matéria orgânica observados neste trabalho e levando-se em consideração a produção anual de lodo, chega-se ao valor agregado total próximo de 52 milhões de reais. Apesar desse alto valor agregado, o lodo de esgoto ainda é disposto quase que totalmente em aterros sanitários, gerando alto custo para sua disposição e ainda imobilizando grande quantidade de nutrientes e matéria orgânica, que poderiam ser reaproveitados no setor agrícola e florestal do Estado.

Com a dificuldade de abertura de novos aterros sanitários e terceirização ou fechamento de aterros públicos, a tendência de disposição final de lodo em aterros privados será cada vez mais frequente e os custos cada vez mais elevados. Como exemplo, o centro de tratamento de resíduos de Seropédica (aterro sanitário), que é o provável destino dos lodos da região metropolitana do Rio de Janeiro após o fechamento do aterro público de Gericinó, cobra em média R\$ 160,00 t⁻¹ para disposição final de lodo de esgoto que contenha menos de 30% de umidade (BIELSCHOWSKY, 2014), sem incluir os custos com transporte, que são custeados pela unidade geradora.

Considerando um panorama em que todo o lodo produzido no Estado fosse disposto em aterros sanitários que praticassem os mesmos valores do Aterro de Seropédica, seriam necessários aproximadamente 21,3 milhões de reais para dispor todo o lodo gerado no Estado em um ano. Neste cenário, estaria sendo pago 21,3 milhões de reais para descartar um material que possui 52 milhões de reais de valor agregado em matéria orgânica e nutrientes. Embora pareça irreal, este panorama representa bem o que está sendo praticado atualmente, não só no Rio de Janeiro, como em todo o Brasil, onde ainda é muito incipiente a prática de reciclagem do lodo de esgoto.

Em um cenário hipotético em que 100% do lodo de esgoto produzido atualmente no estado do Rio de Janeiro fosse reciclado para fertilização agrícola e florestal, anualmente poderiam ser reaproveitados aproximadamente 4.142 toneladas de N, 1.170 toneladas de P, 404 toneladas de K, além de 71.795 toneladas de matéria orgânica. Para fins de comparação, a ureia possui em sua composição 45% de N; as 4.142 t de N presentes no lodo de esgoto, equivaleriam a 9.204 t de uréia. Em relação ao P, as 1.142 t deste nutriente é o mesmo que o encontrado em 14.456 t de superfosfato simples. Já as 404 toneladas de K encontradas no lodo, equivalem a 838 t de cloreto de potássio. O consumo total de fertilizantes químicos no estado do Rio de Janeiro em 2015 foi de 42.683 t (ANDA, 2016), ou seja, neste cenário hipotético, o lodo de esgoto produzido anualmente poderia suprir uma fatia considerável dos nutrientes consumidos no estado.

Boa parte dos fertilizantes consumidos no Rio de Janeiro são utilizados para o cultivo de cana de açúcar, banana, café, aipim, laranja, alface, coco verde, milho, abacaxi e tomate. Estas são as 10 culturas mais plantadas no estado, que representam 83% de toda a área plantada e 64,5% do faturamento agrícola (EMATER, 2014). Destas, apenas aipim e alface

não poderiam ser adubadas com lodo de esgoto, tendo em vista, o disposto na resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006), que proíbe a aplicação em culturas cuja a parte comestível fique em contato direto com o solo. As demais culturas são estrategicamente importantes para futuras ações de reciclagem de lodo de esgoto, necessitando identificar os locais de maior potencial e aprofundar os estudos de logística, para verificar a viabilidade do transporte até estas áreas.

Embora tenha-se avançado no saneamento básico nas últimas décadas, as taxas de coleta e tratamento de esgotos ainda são baixas e muito aquém das metas estabelecidas no Plano Nacional de Saneamento Básico, que pretende atender 85% da população da região sudeste com coleta e tratamento de esgoto sanitário até 2030 (PLANSAB, 2013). Levando-se em consideração a população do estado do Rio de Janeiro, de 16.635.996 habitantes (IBGE, 2016), caso a cobertura de coleta e tratamento de esgotos venha a atender 85% desta população, como pretendido, a geração de lodo de esgoto seria de aproximadamente 387.082 t⁻¹ ano (base seca), ou seja, aumento de 290% do lodo de esgoto gerado nas próximas décadas. Considerando o valor médio da valoração total, o lodo de esgoto que deve ser produzido no estado em 2030 pode ter um valor agregado em N, P, K e matéria orgânica de 151 milhões de reais. Este cálculo não considera o aumento da população e o eventual aumento dos preços dos fertilizantes químicos, o que aumentaria ainda mais esta estimativa.

De acordo com Ghazy et al. (2009) os valores observados por meio da valoração total do lodo de esgoto representa o valor máximo que produtores rurais poderiam pagar pelo lodo de esgoto, considerando os nutrientes nele contidos. No entanto, consultando-se lojas especializadas de insumos agrícolas, pode-se observar que o preço dos fertilizantes orgânicos no Brasil está mais relacionado com a estratégia de venda do que a composição química do material, propriamente dita.

O esterco bovino, por exemplo, possui uma composição média de 18,9 g kg⁻¹ de N, 1,75 g kg⁻¹ de P, 18,8 g kg⁻¹ de K e 362,04 g kg⁻¹ de matéria orgânica (SILVA et al., 2014), submetendo-o a mesma metodologia de valoração utilizada no presente trabalho, encontra-se média de valor agregado total em NPK e MO de R\$ 244,20 t⁻¹ de esterco bovino. Em portais eletrônicos especializados, o valor do esterco bovino puro pode variar de R\$ 120,00 a R\$ 350,00 t⁻¹, quando consultado o preço em atacado ou R\$ 600,00 a até R\$ 2.980,00 t⁻¹ quando considerado o produto em embalagens de 2 a 10 kg (MF Rural, 2016). Desta forma, tão importante quanto valorar o lodo de esgoto, é traçar estratégias para crescimento da demanda, consolidação do mercado e diversificação de usos e produtos.

Um modelo que tem se mostrado viável para gerar a demanda de lodo de esgoto e estimular o mercado, é a distribuição gratuita deste resíduo pelas empresas de saneamento (Souza et al., 2008; Borges et al., 2009; Bittencourt et al., 2014). Atualmente, as empresas de saneamento despendem um valor considerável para dispor o lodo de esgoto em aterros sanitários. A simples distribuição para produtores rurais poderia constituir uma economia para as empresas gestoras de ETEs, as quais estariam ainda proporcionando benefícios sob os aspectos sanitários, ambientais e sociais. Os produtores rurais, por sua vez, se beneficiariam pela melhoria das condições dos solos, aumento de produtividade agrícola e redução dos custos de produção (SOUZA et al., 2008; GHAZY et al., 2009; BITTENCOURT et al., 2014).

Embora o lodo de esgoto possua elevado valor agregado em NPK e matéria orgânica, o real valor de comercialização deste material para reciclagem agrícola dependerá também de outros fatores, como a demanda de mercado, tipo de cultura e principalmente o ramo de atividade. Para a reciclagem como condicionador de solos ou substrato, as características físicas e a presença de matéria orgânica são consideradas mais importantes do que o teor de nutrientes e portanto a forma de valoração deverá ser outra.

3.2. Distância viável de transporte

3.2.1. Distância máxima eficiente de transporte subsidiado pela ETE geradora

As empresas geradoras de lodo de esgoto geralmente alegam que os grandes centros urbanos encontram-se distantes das áreas agrícolas, o que pode inviabilizar o transporte do lodo de esgoto até o produtor rural. Sendo assim, a determinação da distância máxima em que é viável para a unidade geradora arcar com os custos de transporte, é essencial para o planejamento da disposição final do lodo de esgoto.

Observa-se pela tabela 4 que a distância máxima viável de transporte subsidiado pela ETE geradora variou de 247 até 259 km, ou seja, em média, é economicamente viável para as unidades geradoras de lodo analisadas, arcar com o transporte até propriedades que estejam dentro de um raio rodoviário de 255 km da estação, em detrimento ao custo que teria para disposição final dessa carga em um aterro sanitário. Por exemplo, para dispor 12 toneladas de lodo de esgoto no aterro sanitário, seria gasto em média R\$ 2.690,35 incluindo custo do frete e o custo de disposição no aterro; portanto, qualquer propriedade em que o custo do frete até ela seja menor que R\$ 2.690,35 é vantajoso para a ETE arcar com o transporte para reciclagem, uma vez que, estaria contribuindo para uma disposição mais sustentável, sem custos adicionais.

Tabela 4: Distância máxima viável de transporte subsidiado pela ETE até o produtor rural, com base no custo de disposição final (R\$ t⁻¹) do lodo de esgoto contido em um caminhão de 12 toneladas

ETE	Distância até aterro ¹ (km)	Custo do Frete ² (R\$)	Taxa do Aterro ³ (R\$)	Custo de disposição (R\$)	Custo de disposição (R\$ t ⁻¹)	Distância máxima viável (km)
Alegria	71,7	757,15	1.920,00	2.677,15	223,10	254
Barra	77,1	814,18	1.920,00	2.734,18	227,85	259
Ilha	78,2	825,79	1.920,00	2.745,79	228,82	260
Sarapuí	64,8	684,29	1.920,00	2.604,29	217,02	247
Média	73,0	770,35	1.920,00	2.690,35	224,20	255
DesvPad	6,13	64,74	0,00	64,74	5,40	6,13

Distância das ETEs até o aterro sanitário de Seropédica. ²Custo unitário de R\$ 0,44 / t.km⁻¹ (EMOP) – considera-se a distância de ida e volta até o aterro. ³Com base no preço praticado pelo CTR Santa Rosa (aterro de Seropédica) em 2015, para lodos com menos de 30% de umidade.

Bittencourt et al. (2014) ao fazerem um estudo de caso do Programa de reciclagem de lodo de esgoto da região metropolitana de Curitiba-PR, levantaram, que de 2007 a 2010 foram reciclados aproximadamente 88.166 toneladas de lodo de esgoto, distribuídas em 80 propriedades rurais, abrangendo 10 municípios. Os autores verificaram ainda, que a distância entre a ETE e a propriedade rural é altamente variável, sendo a menor distância percorrida pelo Programa, de 32 km e a maior de 213 km.

O Rio de Janeiro é um estado relativamente pequeno em extensão territorial, e a maior concentração de pessoas e conseqüentemente maior produção de lodo de esgoto, encontra-se na região metropolitana. A distância máxima viável de transporte de 255 km em média

possibilita cobrir uma grande área do Estado, incluindo regiões rurais que possuem elevado potencial agrícola e florestal.

Uma das principais possibilidades de reciclagem do lodo de esgoto no estado do Rio de Janeiro é o atendimento dos distritos florestais que foram criados pelo Decreto Estadual nº 45.597 de 10 de março de 2016 (RIO DE JANEIRO, 2016). Este decreto define as áreas prioritárias para fomentar a silvicultura econômica no estado do Rio de Janeiro, definindo cinco áreas prioritárias; os distritos florestais do Médio Paraíba, Serrano e Norte 2, estão dentro do raio de 255 km e podem vir a ser um potencial consumidor do lodo produzido na região metropolitana do Rio de Janeiro. Além disso, os distritos Noroeste e Norte 1, poderiam ser atendidos com os lodos gerados nas grandes cidades do norte fluminense, como Campos dos Goytacazes e Macaé.

A distância máxima viável depende diretamente do custo de disposição final, e este, varia em função da distância em que a ETE se encontra do aterro sanitário, mas principalmente do custo de disposição praticado pelo aterro, que no objeto de estudo representou em média 71,3% do custo total. Desta forma, pode-se inferir que a taxa de disposição cobrada pelos aterros é um dos pontos de maior despesa para ETEs, uma vez que, a disposição final do lodo de esgoto com um todo pode representar de 40 a 60% dos custos de operação de uma estação (GHAZY et al., 2009).

Diante do elevado custo de disposição de resíduos nos aterros sanitários, as empresas de saneamento têm realizado parcerias com estes locais, em que, as empresas de saneamento recebem descontos ou isenções para depositar seu lodo no aterro e se comprometem em tratar parte do chorume gerado pelo aterro (CARLOS et al., 2015). Esta é uma parceria muito comum entre instituições públicas, e nestes casos, em que o custo de disposição se resume ao custo do transporte, a distância máxima viável de transporte subsidiado pela ETE seria o equivalente a distância entre a unidade geradora e o aterro sanitário. No entanto, a implantação de novos aterros está condicionada a implantação de estações de tratamento de chorume nas mesmas, o que inviabilizará este tipo de parceria nos aterros mais modernos.

Martins (2015) ao analisar a viabilidade da reciclagem agrícola na região da grande Florianópolis, encontrou um custo de disposição final em aterro sanitário de R\$ 190,81 até R\$ 206,47 por tonelada. No entanto, a tendência é que o custo de disposição final fique ainda mais caro, visto que, à medida que as áreas aptas à implantação de aterros sanitários vão se esaurindo, os novos aterros tendem a ficar cada vez mais distantes dos grandes centros, aumentando suas tarifas e o custo de transporte.

Os custos de disposição encontrados tanto no trabalho, quanto na bibliografia, indicam custos relativamente baixos quando comparados com o da disposição em alguns países desenvolvidos. Na Holanda, por exemplo, o custo de disposição do lodo em aterro sanitário é de aproximadamente 400 a 500 Euros por tonelada (van LIER, 2013).

Outros países, implementam políticas públicas para favorecer a reciclagem destes resíduos. No Canadá, por exemplo, foi aprovado pelo governo uma medida que visa eliminar até 2020 a incineração ou disposição em aterros sanitários, de lodo de esgoto e outros resíduos orgânicos, pois consideram que a reciclagem na agricultura e silvicultura é mais sustentável, aumentando o estoque de carbono no solo, e contribuindo para minimizar as mudanças climáticas (OUMET et al., 2015). A legislação da Austrália e Nova Zelândia se referem ao lodo de esgoto como um recurso natural e priorizam a reciclagem nas áreas agrícolas e florestais (CHRISTODOULOU; STAMATELATOU, 2016).

O fato da ETE arcar com os custos de transporte e disponibilizar para o produtor rural um material rico em nutrientes e matéria orgânica, sem custos adicionais, configura uma ação sinérgica com reflexos ecológicos, econômicos e sociais.

3.2.2. Distância máxima eficiente de transporte subsidiado pelo produtor rural

Levando-se em consideração os efeitos positivos do lodo de esgoto na produtividade agrícola e na silvicultura, fornecendo nutrientes e matéria orgânica e melhorando as características químicas e físicas dos solos, sua reciclagem passa a ser favorável não apenas para as unidades geradoras de lodo de esgoto que minimizam seus custos de disposição, mas também para os produtores rurais que recebem este material, e podem diminuir seus custos de produção (LEMAINSKI; SILVA, 2006; LOBO et al., 2012; BONINI et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2015; SANTOS et al., 2015). Desta forma, torna-se interessante analisar também a viabilidade do transporte subsidiado pelo produtor rural. Neste caso, o custo com o frete da ETE até a propriedade deve ser menor ou igual ao valor agregado em nutrientes e matéria orgânica contidos na carga.

De acordo com a Tabela 5, em um caminhão contendo doze toneladas de lodo de esgoto estão inseridos, em média, 373,1 kg de N, 105,4 kg de P e 36,4 kg de K, além de 6.466,8 kg de matéria orgânica, o que resulta em um valor agregado médio da carga de R\$ 4.690,02 ou R\$ 390,84 por tonelada de lodo de esgoto. Isso significa que pode ser viável para o produtor rural arcar com os custos de transporte, desde que, o valor do frete seja menor ou igual ao valor agregado da carga.

Tabela 5: Distância máxima viável de transporte subsidiado pelo produtor rural, com base na massa e valor agregado em nutrientes e matéria orgânica contidos em uma carga de 12 toneladas de lodo de esgoto.

Lote	Massa (kg) em 12 toneladas de lodo de esgoto				VAC (R\$)	VA _t (R\$.t ⁻¹)	DMV _f (km)	DMV _{mo} (km)
	N	P	K	MO				
I	1609,53	960,69	151,46	1958,76	4.680,44	390,04	443	185
II	1365,38	1490,94	121,17	2062,08	5.039,57	419,96	477	195
III	761,45	1389,57	63,31	1433,88	3.648,21	304,02	345	136
IV	1387,35	845,28	55,13	2083,68	4.371,45	364,29	414	197
V	1192,95	814,09	47,56	2121,84	4.176,44	348,04	395	201
VI	588,60	857,76	121,17	2155,32	3.722,85	310,24	353	204
VII	1754,60	2687,13	82,70	1857,24	6.381,67	531,81	604	176
VIII	1650,15	1908,90	93,00	1847,52	5.499,57	458,30	521	175
Média	1288,75	1369,30	91,94	1940,04	4690,02	390,84	444	184
Desv.Pad.	421	661	37	235	928	77	88	22

VAC = valor agregado em nutrientes e matéria orgânica em uma carga de 12 toneladas de lodo de esgoto; VA_t = valor agregado em nutrientes e matéria orgânica contidos por tonelada de lodo de esgoto; DMV_f = distância máxima viável de transporte subsidiado pelo produtor rural com base no valor fertilizante; DMV_{mo} = distância máxima viável de transporte subsidiado pelo produtor rural com base apenas no conteúdo de matéria orgânica.

A distância máxima viável para transporte subsidiado pelo produtor rural foi de, em média, 473 km, e variou de 327 a 665 km (Tabela 5). As distâncias obtidas foram substancialmente superiores àquelas observadas quando o transporte é fomentado pela ETE (Tabela 4). Marcon et al. (2015), ao analisar a viabilidade econômica da reciclagem de lodo de esgoto no Brasil, determinaram a distância máxima viável para reciclagem do lodo de

esgoto da UGL Ouro Verde, em Foz do Iguaçu, e encontraram distâncias variando de 525 a 1521 km. No entanto, diferentemente do presente trabalho, os autores não consideraram o trajeto de ida e volta, o que deveria reduzir este raio de viabilidade de transporte pela metade.

Silva et al. (2002) ao analisarem a distância máxima viável para reciclagem do lodo de esgoto no Distrito Federal, com base apenas no valor fertilizador em N e P, encontraram distância máxima de 122 km. No entanto, os autores atribuem esta menor distância à elevada umidade do lodo que trabalharam, entorno de 90 a 95%. Os mesmos autores, afirmam que caso a umidade deste lodo baixasse para 75%, seria possível abranger uma área de até 365 km, visto que diminuiria a quantidade de água transportada e aumentaria a concentração de nutrientes.

Deve-se frisar que a metodologia de determinação da distância máxima de transporte subsidiado pelo produtor rural, utilizada neste trabalho, leva em consideração o valor agregado total em nutrientes e matéria orgânica contidos no lodo de esgoto, o que é desejado quando se utiliza o lodo para fertilização. Porém, dependendo da utilização que o produtor rural pretende empregar o lodo de esgoto, o mesmo deverá utilizar outras formas de valoração. Por exemplo, se a finalidade é a utilização única e exclusivamente como condicionador de solos degradados, a comparação deve ser com base no preço de mercado de condicionadores de solos comerciais e não de fertilizantes químicos, como utilizado no exemplo acima. Para a utilização do lodo de esgoto como substrato para a produção de mudas florestais, a valoração deverá ser realizada através da comparação com os materiais que o viveirista utiliza e que estão disponíveis no mercado, que pode variar desde esterco bovino, compostos orgânicos até substratos comerciais.

4. CONCLUSÕES

Os lodos analisados apresentaram valores em nutrientes e matéria orgânica que viabilizam a logística de transporte destes materiais para áreas com potencial de utilização agrícola e florestal. A reciclagem deste material pode ser vantajosa tanto para as empresas de saneamento, que disponibilizam seu resíduo de forma mais sustentável, como para os produtores rurais, que podem melhorar seus solos e minimizar seus custos, trazendo benefícios econômicos, sociais e ambientais.

5. REFERÊNCIAS

ABREU, A.H.M. **Biossólido na Produção de Mudas Florestais da Mata Atlântica**. 2014, 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais)- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

AGUILERA, S. M., BORIE, G., PEIRANO, P., RODRIGUEZ, M., GREZ, I., ZUNINO, H. Chemical characterization of sewage sludges in Chile and their potential utilization as amendment to reclaim soils for forestation purposes. **Chemosphere**. v. 30, n. 10, p. 1993 – 2003, 2007.

ANDRADE, C.A. de; BOEIRA, R.C.; PIRES, A.M.M. Nitrogênio presente em lodo de esgoto e a resolução nº 375 do CONAMA. In: COSCIONE, A.R.; NOGUEIRA, T.A.R.; PIRES, 19 A.M.M. (Org.). **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após resolução nº 375 do CONAMA**. Botucatu: FEPAF, 2010.p.157-170.

BERTON, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R. Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA**. Botucatu: FEPAF, 2010. cap. 2, p. 31-50.

BIELSCHOWSKY, M.C. **Modelo de Gerenciamento de Lodo de Estação de Tratamento de Esgotos: Aplicação do Caso da Bacia da Baía de Guanabara**. 2014, 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BONINI, C.S.B. ; ALVES, M.C ; MONTANARI, R. Lodo de Esgoto e Adubação Mineral na Recuperação de Atributos Químicos de Solo Degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.4, p. 388-393, 2015.

BORGES, T. A. et al. Uso de lodo de esgoto na recuperação de área degradada no Distrito Federal. **Revista AIDIS**, Juruquilla, v. 2, n. 1, p. 65 – 75, 2009.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 02 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução – CONAMA. Resolução no 375/2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, n. 167, p. 141-146, 30 ago 2006.]

CALDEIRA, M. V. W.; FAVALESSA, M.; GONÇALVES, E. O.; DELARMELINA, W. M.; SANTOS, F. E. V.; VIEIRA, M. Lodo de Esgoto Como Componente de Substrato para produção de mudas de Acacia Mangium Wild. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v.5, n.1, p.34-43, 2014.

CALDEIRA, M.V.; DELARMELINA, W.M.; PERONI, L.; GONÇALVES, E.O.; SILVA, A.G. Lodo de Esgoto e Vermiculita na Produção de Mudas de Eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v.43, n.2, p.155-163, 2013.

CARVALHO, C. S; RIBEIRINHO, V. S.; ANDRADE, C. A.; GRUTZMACHER, P.; PIRES, A. M. M. Composição Química da Matéria Orgânica de Lodos de Esgoto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.10, n.3, p. 413-419, 2015.

CHIBA, M. K; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. Cultivo de Cana de açúcar em Argissolo Tratado com Lodo de Esgoto.I- Disponibilidade de Nitrogênio no Solo e Componentes de Produção. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 32, n. 2, p 653 -674, 2008.

CONSUEGRA, S.B.M.; NAVARRO, F.J.G.; VILLAJOS, J.A.A.O.; REYES, C.P.; HIGUERAS. P.L. Effect of the addition of sewage sludge as a fertilizer on a sandy vineyard soil. **Jornal of Soilsand Sediments**, v. 16, n. 4, p. 1360 – 1365, 2016.

DIAS, C. L. **Estabelecimento de valores de alerta e limites máximos no lodo de esgoto**. CETESB, 2004. Relatório técnico interno. 50 p. Relatório técnico interno.

FJÄLLBORG, B. et al. Identification of metal toxicity in sewage sludge leachate. **Environment International**, v.31, n.1, p.25-31, 2005.

FRANCO, O.; SOTO, A.; LÓPEZ, L. Recuperación Del Fósforo Presente em El Biosólido Después de Ser Sometido a Um Tratamiento Térmico. **Dyna Energía y Sostenibilidad**, v. 59, p. 1 – 12, 2014.

GRAZY, M.; DOCKHOM, T.; DICHTL, N. Sewage Sludge Management in Egypt: Current Status and Perspectives Towards a Sustainable Agricultural Use. **Internacional Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering**. v.3, n.9, 2009.

GUILHERME, L. R. G. et al. Elementos traço em lodo de esgoto: Avaliação de risco à saúde após o uso agrícola In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA**. Botucatu: FEPAF, 2010. p. 137-156.

LOBO, T.F.; GOES FILHO, H.; BULL, L.T.; SOUZA, F.L.P. Efeito do Nitrogênio e do Lodo de Esgoto na Nutrição do Feijoeiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**. V.10, N.2, P.33-41, 2015.

LU, Q.; HE, Z.L.; STOFFELLA, P.J. Land Application of Biosolids in the USA: a Review. **Review Article**. v.2012, n.11, 2012.

MACHADO, V.J.; SOUZA, C.H.E.; ANDRADE, B.B.; LANA, R.M.Q. Curvas de Disponibilidade de Fósforo em Solos com Diferentes Texturas Após Aplicação de Doses Crescentes de Fosfato Monoamônico. **Bioscience Journal**. V.27, n.1, p. 70-76, 2011.

MARCON, M.K.F. **Viabilidade Econômica da Utilização Agrícola do Biosólido da Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) Ouro Verde**. 2014, 50 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná.

MARCON, M.K.F.; FRIGO, E.P.; NOGUEIRA, C.E.C.; ALVES, H.J.; ALBRECHT, L.; FRIGO, J.P. Economic Viability of The Agricultural Recycling of Sewage Sludge in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**. v.10, pp. 2159-2164, 2015.

MARTINEZ, A.A.; GEA, G.; ARAUZO, J.; KERSTEN, S.R.A.; KOOTSTRA, A.M.J. Phosphorus recovery from sewage sludge char ash. **Biomass e Bioenergy**. v.65, p.42-50, 2014.

MARTINS, L.E. **Análise da Viabilidade da Reciclagem Agrícola do Lodo de Esgoto na Região da Grande Florianópolis**. 2015, 115 f. Monografia (Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MTSHALI, J.S.; TIRUNEH, A.T.; FADIRAN, A.O.; Characterization of Sewage Sludge Generated From Wastewater Treatment Plants in Swaziland in Relation to Agricultural Uses. **Resources and Environment**. v.4, p.190-199, 2014.

PAIVA, A.V.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J.L.M.; FERRAZ, A.V. Crescimento de Mudanças de Espécies Arbóreas Nativas, Adubadas com Diferentes Doses de Lodo de Esgoto Seco e com Fertilização Mineral. **Scientia Forestalis**. v.37, n.84, p. 499-511, 2009.

PIRES, A.M.M.; ANDRADE, C.A.; SOUZA, N.A.P.; CARMO, J.B.; COSCIONE, A.R.; CARVALHO, C.S.; Disponibilidade e Mineralização do Nitrogênio Após Aplicações Sucessivas de Lodo de Esgoto no Solo, Estimadas por Meio de Incubação Anaeróbica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.50, n.4, p.333-342, 2015.

QUINTANA, N.R.G.; CARMO, M.S.; MELO, W.J. Lodo de Esgoto como Fertilizante: Produtividade Agrícola e Rentabilidade Econômica. **Nucleus**. V.8, n.1, 2011.

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

SAMPAIO, A. O. Adequação das estações de tratamento de esgotos sanitários à resolução número 375 do CONAMA In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA**. Botucatu: FEPAF, 2010., p. 265-278.

SAMPAIO, T.F.; GUERRINI, I.A.; OTERO, X.L.; VAZQUEZ, F.M.; BOGIANI, J.C.; OLIVIEIRA, F.C.; MARCIA, J.L.G.; CIOL, M.A.; LITTKE, K.M.; HARRISON, R.B. The Impact of Biosolid Application on Soil and Native Plants in a Degraded Brazilian Atlantic Rainforest Soil. **Water Air and Soil Pollution** v.227, n.1, p1-10, 2016.

SILVA, P.H.M.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; MOREIRA, R.M.; Crescimento de *Eucalyptus grandis* Tratado com Diferentes Doses de Lodo de Esgoto Úmido e Seco, Condicionados com Polímeros. **Scientia Florestalis**. v.36, n.77, p. 79-88, 2008.

SUHADOLCA, M.; SCHOLL, R.; HANG, A.; DORFLER, U.; SCHLOTTER, M.; LOBNIK, FRANC. Single Application on of Sewage Sludge- Impact on The Quality of an Alluvial Agricultural Soil. **Chemosphere**. V.81, p. 1536-1543, 2010.

TSUTIYA, M. T. **Biossólidos na Agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001, 113 p.

VAN LIER, J. Notas de aula do curso CTB3365x - Introduction to Water Treatment, Aula W6a - Thinckening. TUDelftx, 2013. Disponível em: www.edx.org. Acesso em Jan 2014.

YADA, M.M., MELO, W.J., MINGOTE, F.L.C., MELO, V.P., MELO, G.M.P. Chemical and biochemical propertiers of Oxisols after sewage sludge application for 16 years. **Revista Brasileira de Ciências do Solo** v. 30, p.1302 – 1310, 2015.

CAPITULO III

ZONEAMENTO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO PARA RECICLAGEM AGRÍCOLA E FLORESTAL DO LODO DE ESGOTO

RESUMO

O estudo tem como objetivo mapear a área apta à aplicação de lodo de esgoto no solo e inferir sobre possibilidades e perspectivas para reciclagem no uso agrícola e florestal do lodo no estado do Rio de Janeiro. Para identificação das áreas com aptidão à aplicação de lodo de esgoto no solo, foram respeitados os parâmetros restritivos locais estipulados pela resolução CONAMA nº 375/2006. Para análise das perspectivas de reciclagem no uso agrícola e florestal, foram consultados dados sobre a área ocupada por agricultura e povoamentos florestais no estado do Rio de Janeiro. Foram identificados e espacializados 1.270.740 hectares sem restrições locais à aplicação de lodo de esgoto no solo, o que corresponde a 32,25% do território do estado do Rio de Janeiro. Foi levantado ainda, que 86,5% da área agrícola do estado é cultivada com culturas agrícolas que não possuem restrições à fertilização com lodo de esgoto, totalizando 149.734 hectares. Além dos 18.426 hectares plantados com espécies florestais, os distritos florestais delimitados pelo estado do Rio de Janeiro, serão de importância estratégica futura para a reciclagem de lodo de esgoto no estado. Todo o lodo de esgoto gerado atualmente no estado demandaria apenas 1% destas áreas aptas para disposição no solo.

Palavras chave: SIG, mapeamento e bio-sólido.

ABSTRACT

The present study aims to map the area suitable for the application of sewage sludge in the soil and infer about possibilities and perspectives for recycling in the agricultural and forestry use of sludge in the state of Rio de Janeiro. In order to identify the areas with aptitude for the application of sewage sludge in the soil, the restrictive locational parameters stipulated in CONAMA Resolution No. 375/2006 were respected. In order to analyze the prospects for recycling in agricultural and forestry use, data were collected on the area occupied by agriculture and forest plantations in the state of Rio de Janeiro. The application of sewage sludge to the soil was identified and spatialized 1,270,740 ha without locational restrictions, which corresponds to 32.25% of the territory of the state of Rio de Janeiro. It was also pointed out that 86.5% of the state's agricultural area is cultivated with agricultural crops that do not have restrictions on fertilization with sewage sludge, totaling 149,734.26 ha. In the forest area, it is believed that besides the 18,426.96 ha planted with forest species, the forest districts delimited by the state of Rio de Janeiro, will be of great strategic importance for the future recycling of sewage sludge in the state. All the sewage sludge currently generated in the state would require only 1% of these areas suitable for disposal in the soil.

Key words: GIS, mapping and biosolids.

1. INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto é o resíduo gerado no processo de tratamento de esgotos sanitários, rico em matéria orgânica e nutrientes, principalmente N, P e S, mas que sem o devido tratamento e estabilização pode ser prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente (BOURIOUG et al., 2015; BRASIL, 2006). No Brasil, a principal forma de disposição final deste resíduo têm sido os aterros sanitários. Pesquisas abordando a reciclagem deste material tem ganhado destaque nos últimos anos, principalmente como fertilizante de culturas agrícolas e florestais (LOBO et al., 2012; XUE et al., 2015; SAMPAIO et al., 2016), condicionador de solos para recuperação de áreas degradadas (SAMPAIO et al., 2012; BONINI et al., 2015a; BONINI et al., 2015b) e substrato para produção de mudas florestais nativas, exóticas e ornamentais (ERDOGAN et al., 2011; SANTOS et al., 2014; TRAZZI et al., 2014; ABREU et al., 2017a, CABREIRA et al., 2017).

Embora o Brasil apresente grande potencial para reciclagem do lodo de esgoto, com vastas áreas de pastagens degradadas, solos exauridos e com considerável produção agrícola e florestal, esta pratica ainda é muito incipiente no País (BITTENCOURT et al., 2017). Isto coloca o Brasil na contra mão da tendência mundial de aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos, principalmente o lodo de esgoto. Na Espanha, a região da Catalunha dispõe em solos agrícolas e florestais mais de 85% do lodo de esgoto gerado (VASKAN et al., 2013). Portugal, Irlanda, Reino Unido e França reciclam em suas áreas agrícolas e florestais mais de 75% do lodo de esgoto gerado (EUROSTAT, 2015; BOURIOUG et al., 2015). Segundo Lu et al. (2012), no ano de 2010 nos EUA aproximadamente 60% do lodo de esgoto gerado é destinado à aplicação em culturas agrícolas e florestais.

Apesar de seu benefício como fertilizante, a aplicação de lodo de esgoto no solo necessita de uma gestão cuidadosa, para evitar potenciais impactos negativos, principalmente relacionados a contaminação do solo e da água (TORRI et al., 2017). A necessidade de diretrizes seguras para reciclagem deste material, fez com que o Conselho Nacional do Meio Ambiente publicasse a resolução n° 375/2006 (BRASIL, 2006), através da qual regulamenta e define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário.

A definição das terras agrícolas adequadas à aplicação do lodo de esgoto envolve um conjunto de critérios, que são baseados em dados da legislação, da literatura e conhecimento de especialistas (PASSUELO et al., 2012). O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) pode ser de grande valia neste processo, pois através de técnicas de geoprocessamento pode-se integrar diferentes informações e identificar os locais ambientalmente seguros para a aplicação de lodo de esgoto ao solo, minimizando possíveis impactos ambientais e sociais negativos (PASSUELO et al., 2012; VASKAN et al., 2013).

A delimitação de áreas aptas e áreas restritas a aplicação de lodo de esgoto ao solo, pode orientar futuras ações de reciclagem deste resíduo, identificando as regiões e municípios com maior potencial para utilização deste material. O Rio de Janeiro é o terceiro estado mais populoso do Brasil, e segundo dados do PERS (2014), até o ano de 2013, a população gerava anualmente 135.225 toneladas de lodo de esgoto na base seca por ano e a tendência é que essa produção cresça nos próximos anos, com o avanço da cobertura de coleta e tratamento de esgotos. Portanto, para facilitar a construção de estratégias de reciclagem deste material é necessário analisar conjuntamente as áreas aptas a receber lodo de esgoto no estado e a vocação agrícola e florestal de cada região administrativa.

O presente estudo tem como objetivo mapear no estado do Rio de Janeiro as áreas aptas ao recebimento de lodo de esgoto no solo, tendo por base a resolução do CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006), e inferir sobre possibilidades e perspectivas para reciclagem no uso agrícola e florestal deste material.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a determinação das áreas aptas e inaptas a aplicação de lodo de esgoto ao solo no estado do Rio de Janeiro foi utilizado o ambiente SIG, através do software ArcGis 10.2.1. Como critérios para identificação de áreas que possuem restrições a aplicação de lodo de esgoto no solo, foram adotados os parâmetros contidos no artigo 15 da resolução CONAMA nº 375/2006 (BRASIL, 2006), que trata das restrições locais e da aptidão do solo das áreas de aplicação. A área de estudo foi subdividida em oito regiões, conforme a Fundação CEPERJ (2014) (Figura 1).

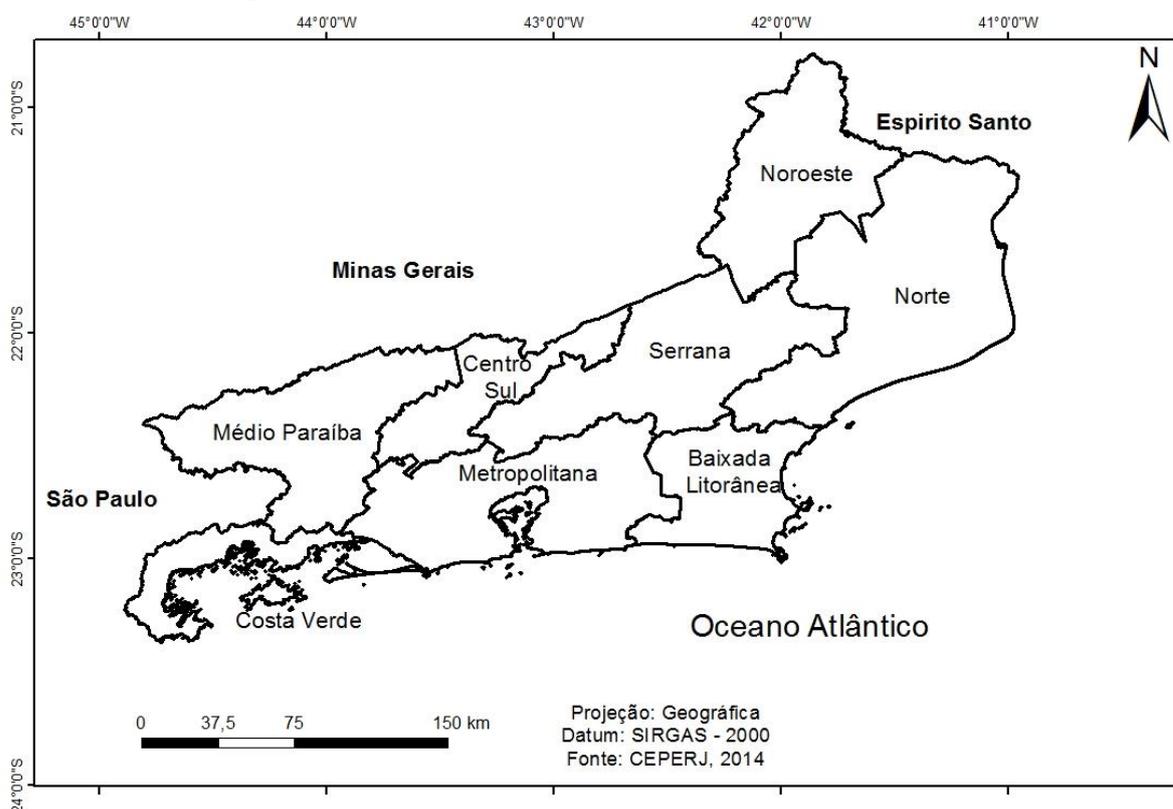


Figura 1: Áreas de estudo compreendendo as regiões administrativas do estado do Rio de Janeiro, de acordo com a Fundação CEPERJ (2014).

Foram adotados os seguintes critérios de impedimento legal ou ambiental à aplicação de lodo de esgoto ao solo: I – Unidades de Conservação, com exceção das Áreas de Proteção Ambiental (APA), já que a legislação não restringe o uso de lodo de esgoto nas APAs; II – Áreas de preservação permanente (APP); III – Raio mínimo de 100 m de áreas urbanizadas; IV – Distância mínima de 15 m de vias de domínio público; V – Áreas cuja declividade ultrapasse 25%; VI – Solos rasos ou hidromórficos; VII – Áreas ocupadas com remanescentes florestais.

Os dados no formato *shapefile* referentes aos parâmetros restritivos foram obtidos gratuitamente através de instituições idôneas (Tabela 1), gerando sete mapas preliminares que posteriormente foram sobrepostos para geração do mapa final. Em função das diferentes escalas dos mapas base, a mínima unidade mapeável do mapa final foi de 1 km².

Tabela 1: Fonte de dados e processamento realizado para identificação e espacialização das áreas com restrição a aplicação do lodo de esgoto no solo de acordo com a Resolução CONAMA nº 375 / 2006.

Critérios	Fonte	Detalhamento
Unidades de Conservação	IBAMA (2014)	Retirada dos polígonos referentes às áreas de proteção ambiental (APA)
Áreas de Preservação permanentes (APP)	INEA (2016)	<i>Buffer</i> de 30 metros na hidrografia; <i>buffer</i> de 50 m em nascentes; <i>buffer</i> de 200 metros em grandes rios, lagos e lagoas. Localização dos topos de morros foi disponibilizado pelo INEA.
Áreas Urbanas	S. O. S. Mata Atlântica (2014)	<i>Buffer</i> de 100 m ao entorno das áreas urbanas.
Vias públicas	DER-RJ (2016)	<i>Buffer</i> de 15 m ao entorno das estradas e rodovias.
Declividade	TOPODATA/SRTM / INPE	A partir do MDE corrigido, utilizou-se a ferramenta <i>slope</i> para gerar a declividade e posteriormente identificadas as áreas com declividade superior a 25%.
Solos rasos ou hidromórficos	EMBRAPA (2005)	Cambissolos, Espodossolos, Gleissolos, Neossolos, Planossolos, afloramentos rochosos e salinas, foram classificados como inapropriados por apresentarem algum impedimento descrito no mapa de solos.
Remanescentes florestais	S. O. S. Mata Atlântica (2014)	As áreas com remanescentes florestais, mangues, restingas, ou vegetação natural não florestal foram classificados como inapropriados.

Após o processamento e reclassificação dos mapas originais, recorreu-se as operações de conjuntos para unir, juntar ou dissolver os geocampos existentes, sendo representados no ArcGIS pelas opções *union*, *merge* e *dissolve*, respectivamente. Após este processo, foi gerado um mapa único, representando as áreas do Estado do Rio de Janeiro que possuem algum impedimento legal ou ambiental à aplicação de lodo de esgoto no solo.

Após identificar as áreas com restrição à aplicação de lodo de esgoto ao solo, foi utilizada a ferramenta *erase* para determinar as áreas aptas à aplicação do lodo de esgoto, ou seja, aquelas que não possuem as restrições impostas pela Resolução CONAMA nº 375/ 2006. Para isso, utilizou-se o mapa do estado do Rio de Janeiro como plano de fundo e as áreas com impedimento de aplicação entraram como polígonos de exclusão, desta forma, após este processamento, restaram no mapa, apenas as áreas sem restrições de aplicação de lodo de esgoto ao solo. Vale ressaltar, que foram excluídas do processamento dos dados as ilhas do estado do Rio de Janeiro, devido à dificuldade de implementação de planos de reciclagem de lodo de esgoto nestes locais.

Para analisar as perspectivas de reciclagem no uso agrícola do lodo de esgoto no estado do Rio de Janeiro, os dados gerados referentes às áreas aptas a aplicação do lodo de esgoto foram analisados conjuntamente com os dados do Acompanhamento Sistemático da Produção Agrícola, elaborado e disponibilizado pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio de Janeiro (EMATER, 2014). Foram levantadas as áreas ocupadas por

culturas agrícolas aptas a receberem o lodo de esgoto como fertilizante e/ou condicionador de solos, de acordo com o artigo 12 da resolução CONAMA n° 375 / 2006. Este artigo veta a utilização de lodo de esgoto em olerícolas, tubérculos e raízes, culturas inundadas, bem como demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo (BRASIL, 2006). Portanto, foram analisadas apenas as culturas agrícolas que não se enquadram nos parâmetros supracitados. Foram identificados, os municípios que possuem as maiores áreas plantadas com culturas aptas a serem fertilizadas com lodo de esgoto.

Para a área florestal foram identificados na literatura os possíveis usos do lodo de esgoto no setor florestal e consultados dados oficiais e ou estudos estratégicos, para determinar o potencial de reciclagem deste material no setor florestal do estado do Rio de Janeiro. Com base nestes dados, foram propostos usos estratégicos para o lodo de esgoto em cada região.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram identificados 1.270.740 hectares sem restrições locais a aplicação de lodo de esgoto no solo, o que corresponde a 32,25 % do território do estado do Rio de Janeiro. A região que apresentou a maior área com aptidão a aplicação do lodo de esgoto foi a Norte Fluminense, com 332.096 ha sem restrições, seguida pelas regiões do Médio Paraíba e Noroeste Fluminense que apresentaram 235.172 e 234.484 ha, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1: Área apta a aplicação do lodo de esgoto ao solo respeitando os parâmetros locais da resolução CONAMA N°375 / 2006, nas regiões administrativas do Estado do Rio de Janeiro.

Região	Área total (ha)	Área inapta (ha)	Área apta (ha)	¹ Aptas Região (%)	² Aptas Estado (%)
Baixadas Litorâneas	328.068	231.609	96.458	27,64	2,45
Centro sul	273.057	157.528	115.529	40,57	2,93
Costa Verde	215.540	184.780	5.643	2,98	0,14
Médio Paraíba	556.815	321.642	235.172	43,63	5,97
Metropolitana	580.859	474.506	131.470	22,56	3,34
Noroeste	484.149	249.665	234.484	49,06	5,95
Norte	877.081	554.985	322.096	36,78	8,17
Serrana	624.718	494.830	129.888	24,59	3,30
Total geral	3.940.286	2.669.546	1.270.740		32,25

¹Porcentagem de área apta em relação a região administrativa; ²Porcentagem de área apta em relação a área total do Estado do Rio de Janeiro.

Considerando-se que até dados do ano de 2013 o estado gera anualmente 133.225 t de lodo de esgoto (PERS, 2014) e adotando uma recomendação conservadora de 10 t. ha⁻¹ (ABREU et al. 2017b), seriam necessários 13.322,5 ha para absorver toda a produção anual de lodo de esgoto do estado, o que corresponde a aproximadamente 1% da área apta a aplicação do lodo de esgoto no solo encontrada no presente estudo.

É importante salientar que a reciclagem de lodo de esgoto deve ser vista de forma abrangente, pois nem sempre as grandes cidades geradoras de lodo, são grandes produtoras agrícolas. Bittencourt et al. (2014) ao analisar o programa de reciclagem de lodo de esgoto no estado do Paraná, observaram que a distância entre a estação de tratamento e as áreas de aplicação variaram de 32 a 213 km, constituindo um exemplo prático de que pode-se trabalhar planos de reciclagem a nível regional.

A região da Costa Verde possui a menor área apta a aplicação de lodo de esgoto, com 8.870 ha observados, correspondendo a apenas 4,12% da área total da região e representando apenas 0,14% da área apta do estado (Tabela 1). Os fatores que mais contribuíram para a limitação locacional nesta região foram a presença de áreas declivosas, grandes fragmentos com remanescentes florestais, além das Unidades de Conservação que abrangem grande parte desta região.

Mangaratiba é o município com maior representatividade agrícola na região da Costa Verde, responsável por 84% da área agrícola plantada nesta região, com 4.878 ha agrícolas (EMATER, 2014). No entanto, Mangaratiba possui apenas 3,10% (1.031 ha) de sua área apta a aplicação de lodo de esgoto no solo, um dos menores índices entre os municípios do Estado, e assim como em toda a região da Costa Verde, as áreas aptas ainda encontram-se dispersas umas das outras, o que não é desejável na implantação de planos de reciclagem de lodo de esgoto (Figura 2).

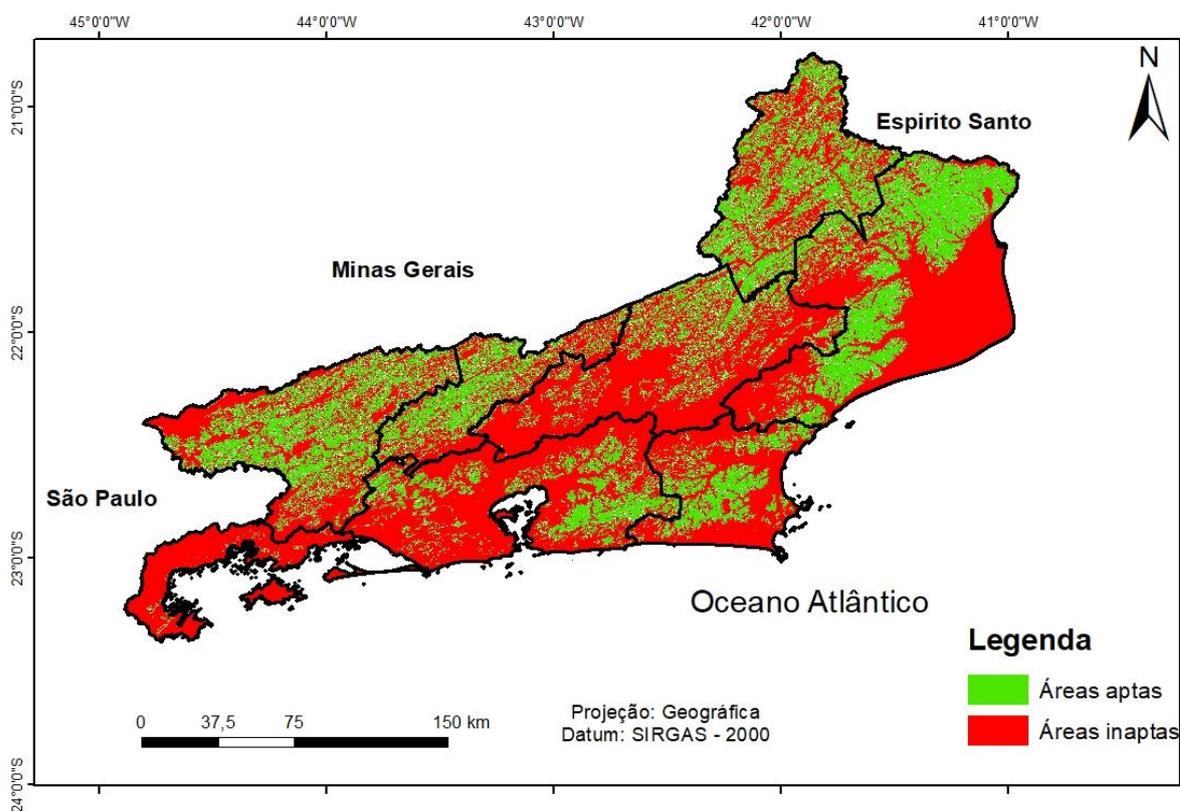


Figura 2: Espacialização da área apta a aplicação de lodo de esgoto no solo para o Estado do Rio de Janeiro, de acordo com os parâmetros restritivos locacionais contidos na Resolução CONAMA nº 375/2006.

As regiões norte e noroeste do estado do Rio de Janeiro são as que apresentam maior potencial para reciclagem agrícola do lodo de esgoto, pois além de apresentarem a maior área apta (Figura 2), são também regiões com elevada relevância agrícola, responsáveis por 63% de toda a área agrícola plantada do estado (Tabela 2), e onde se localiza mais de 94% da área plantada com cana de açúcar, mais de 98% da área plantada de abacaxi, 83% da área plantada com café e 49% da área ocupada por coco verde no estado (EMATER, 2014).

Na região norte, os municípios de Campos dos Goytacazes e São Francisco do Itabapoana são os que apresentam maiores áreas aptas a aplicação de lodo de esgoto ao solo, com 136.174 e 57.952 ha, respectivamente. Estes municípios destacam-se também como grandes produtores agrícolas, principalmente cana de açúcar, abacaxi e coco verde, culturas

que não possuem restrições legais a fertilização com lodo de esgoto (EMATER, 2014; BRASIL, 2006). Nesta região, encontram-se 86.595,80 ha cultivados com 22 culturas agrícolas que podem receber lodo de esgoto como fertilizante ou condicionador de solos, o que corresponde a 95,3% de toda a área plantada da região norte (Tabela 2).

Tabela 2: Área agrícola do Estado do Rio de Janeiro ocupada por culturas aptas a fertilização com uso do lodo de esgoto, de acordo com os parâmetros restritivos estipulados pela resolução CONAMA nº 375 / 2006.

Região	Área agrícola total (ha)	Nº de culturas cultivadas	Nº de culturas ¹ aptas	Área ocupada pelas culturas ¹ aptas (ha)	Área com Culturas ¹ aptas (%)
Baixadas litorâneas	12.331,19	27	18	11.348,38	92,0
Centro Sul	1.451,59	30	20	1.124,00	77,4
Costa Verde	6.120,78	11	9	5.974,70	97,6
Médio Paraíba	2.223,74	31	16	1.840,80	82,8
Metropolitana	19.434,2	40	25	13.604,59	70,0
Noroeste	17.891,37	36	25	17.253,54	96,4
Norte	90.864,68	32	22	86.595,80	95,3
Serrana	22.867,12	49	23	11.992,45	52,4
Total	173.184,67	61	32	149.734,26	86,5

¹Aptas a fertilização com lodo de esgoto de acordo com a Resolução CONAMA nº 375/2006. Fonte: Acompanhamento Sistemático da Produção Agrícola - ASPA, Estado do Rio de Janeiro, 2015 - SISTEMA AGROGEO / Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado do Rio de Janeiro - EMATER - RIO/CPLAN/NIDOC.

A cana de açúcar é a principal cultura agrícola do estado do Rio de Janeiro, responsável por 51% de toda área agrícola plantada e corresponde a 15% de todo o faturamento agrícola do estado (EMATER, 2014). Neste sentido, a região norte é de grande importância, visto que 91% da área plantada de cana de açúcar encontra-se nesta região. A reciclagem do lodo de esgoto nas áreas agrícolas, principalmente de cana de açúcar, pode representar uma considerável economia com fertilizantes químicos, proporcionando benefícios econômicos, ambientais e sociais. Chiba et al. (2008) e Franco et al (2010) analisaram a eficiência do lodo de esgoto na fertilização da cana de açúcar e concluíram que o lodo pode suprir até 100% da necessidade de adubos nitrogenados. Dado a importância do setor sucroalcooleiro para a economia agrícola do estado do Rio de Janeiro, a utilização do lodo de esgoto como fertilizante deve ser tratado como um assunto estratégico para o setor agrícola fluminense.

Na região Noroeste, os municípios com maior área apta a aplicação de lodo no solo são Itaperuna, Santo Antônio de Pádua e Itaocara, que possuem 48.047, 30.314 e 23.916 ha aptos, respectivamente. Nesta região somam-se 17.253,54 ha cultivados com culturas aptas a fertilização com lodo de esgoto. Dentre as 25 culturas aptas cultivadas na região noroeste (Tabela 2), destaca-se a produção agrícola de café, milho e cana de açúcar, culturas que se localizadas em locais aptos a aplicação de lodo de esgoto, poderiam facilmente absorver o lodo de esgoto gerado na região.

Nas regiões Norte e Noroeste, o lodo de esgoto poderia desempenhar ainda a importante função de condicionador de solos para recuperação de áreas degradadas, visto que os solos destas regiões são pobres e alguns locais estão sofrendo processo de desertificação. De forma geral, aproximadamente 50% da fração sólida do lodo de esgoto é constituída de matéria orgânica (ABREU et al., 2017b), que possui reconhecido benefício na melhoria das

características químicas, físicas e biológicas dos solos (KOMINKO et al., 2017). O condicionamento do solo com lodo de esgoto melhora a agregação, porosidade e aumenta a capacidade de retenção de água, o que pode contribuir para minimizar os impactos da baixa precipitação que é característica nestas regiões (BONINI et al., 2015; XUE et al., 2015; SAMPAIO et al., 2016).

Estas duas regiões possuem juntas, apenas 1.118,67 ha de reflorestamentos comerciais (AMORIM et al., 2012), porém, encontram-se entre as regiões mais promissoras para a silvicultura comercial de acordo com o Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Rio de Janeiro (SEA, 2016). O Decreto nº 45.597 de 10 de março de 2016 definiu cinco áreas destinadas à implantação de distritos florestais, ou seja, áreas prioritárias para o fomento e desenvolvimento da silvicultura no Estado. Destes cinco distritos, dois localizam-se na região norte, totalizando 293.998,69 ha de áreas consideradas aptas à implantação de silvicultura comercial. Já na região noroeste foi delimitado um distrito florestal com 97.845ha. Tendo em vista os benefícios da fertilização com lodo de esgoto na cultura do eucalipto, podendo minimizar a necessidade das adubações nitrogenadas e fosfatadas, bem como a demanda de micronutrientes (SILVA et al., 2008), a inclusão destes distritos florestais como possíveis destinos do lodo gerado é uma questão estratégica e de grande relevância econômica e ambiental.

As regiões do Médio Vale do Paraíba e Centro Sul Fluminense foram grandes produtoras agrícolas no passado, principalmente durante o ciclo do café, mas atualmente sua produção agrícola é bastante incipiente e a economia rural se baseia na pecuária extensiva. As regiões do Médio Paraíba e Centro Sul Fluminense são as duas regiões com menores áreas agrícolas plantadas no Estado, e possuem 1.840,80 e 1.124,00 ha cultivados com culturas aptas à fertilização com lodo de esgoto, respectivamente.

Na região Centro Sul Fluminense foi quantificado 115.529 ha aptos a aplicação de lodo de esgoto ao solo e os municípios com maiores áreas aptas são Vassouras com 27.290 ha, Paraíba do Sul com 26.963 ha e Paty do Alferes que possui 15.988 ha aptos. As principais culturas agrícolas cultivadas nesta região são tomate, pimentão e banana (EMATER, 2014). Na região do Médio Vale do Paraíba destacam-se os municípios de Valença com 51.778 ha aptos, Resende com 39.002 ha, Barra Mansa com 29.492 ha e Barra do Piraí com 28.389 ha sem restrições locais a aplicação de lodo de esgoto no solo.

O lodo de esgoto pode ser utilizado nestas regiões como condicionador de solos, visto que ao longo dos ciclos produtivos os solos destas regiões foram degradados e atualmente encontram-se depauperados (MIRANDA et al., 2015). Como a pecuária extensiva ocupa grandes áreas de pastagens degradadas nestas regiões, a utilização do lodo de esgoto para recuperação de pastagens através do sistema silvipastoril pode ser uma alternativa viável técnica e ambientalmente. Neste sistema, já foi comprovado a eficácia do lodo de esgoto na melhoria as características químicas, físicas e biológicas do solo, podendo aumentar a produtividade tanto do componente arbóreo, como da pastagem (LOSADA et al., 2012; DOMINGUÉZ et al., 2014).

A legislação brasileira determina que pastagens só podem ser implantadas após um período mínimo de 24 meses da aplicação do lodo de esgoto no solo (BRASIL, 2006). Desta forma, o lodo de esgoto pode ser aplicado inicialmente como condicionador de solos e fertilizante para o componente arbóreo implantado, e após o período determinado pela legislação, implanta-se a pastagem, com um solo já em melhores condições e as árvores já crescidas, sem risco de danos físicos causados pelos animais. A implantação do sistema silvipastoril constitui uma importante fonte de complementação e diversificação da renda do produtor rural, tendo importância econômica, social e ambiental (MATOSO e SALMAN, 2016).

Outra potencial utilização para o lodo de esgoto nas regiões do Médio Paraíba e Centro Sul Fluminense é como fertilizante nas plantações florestais. Amorim et al. (2012) mapearam por meio de técnicas de geoprocessamento os plantios florestais no estado do Rio de Janeiro e constataram que 55,1% da área plantada com eucalipto no estado (10.154,18 ha), localiza-se nestas duas regiões. Além disso, na região do Médio Paraíba também está delimitado um distrito florestal com 166.567 ha, o que pode futuramente aumentar ainda mais a importância desta região na silvicultura do estado (SEA, 2016).

A região Metropolitana do Rio de Janeiro possui 128.242 ha aptos à aplicação de lodo de esgoto ao solo (Tabela 1). Esta é uma região extremamente importante para a reciclagem agrícola do lodo, pois é onde encontra-se a maior densidade populacional e conseqüentemente é a região com maior potencial de geração de lodo no estado. Nesta região, destacam-se os municípios de Rio Bonito, com 21.151 ha, Itaboraí, com 19.148 ha e Cachoeiras de Macacu com 17.773 ha sem restrições à aplicação de lodo de esgoto no solo. Na região Metropolitana encontram-se 13.604,59 ha cultivados com espécies agrícolas aptas a serem fertilizadas com lodo de esgoto (Tabela 2) e as culturas com maiores áreas plantadas nesta região são laranja, banana e milho.

Além da reciclagem como fertilizante agrícola, outras utilizações podem ser atribuídas ao lodo de esgoto na região metropolitana. O uso como condicionador de solos para plantios de arborização urbana, substrato orgânico ou “terra adubada” para paisagismo, substrato para produção de mudas florestais e até mesmo como cobertura de taludes em aterros sanitários, podem alguns dos usos sustentáveis.

O uso como condicionador de solos para plantios de arborização urbana possui a vantagem dos locais de plantio estarem próximo aos locais onde o lodo de esgoto é gerado. Apenas na cidade do Rio de Janeiro foram plantadas em 2014 pela Fundação Parques e Jardins, aproximadamente 54.000 mudas de arborização urbana (FPJ, 2015). Em plantios desta natureza, recomenda-se retirar todo o solo da cova de plantio e adicionar condicionador de solo para melhorar as condições de crescimento das plantas. Considerando-se a preparação de um condicionador com apenas 50% de lodo de esgoto para preenchimento da cova, o que corresponde a 0,4 m³, ou 220 kg de lodo por planta, seriam necessários 11.880 toneladas para atender a demanda das 54.000 mudas, o que corresponde a aproximadamente 9% de todo o lodo que é gerado no estado anualmente.

Muitos autores têm encontrado resultados positivos, confirmando o potencial do lodo de esgoto como substrato para produção de mudas florestais (ROCHA et al., 2013; CALDEIRA et al., 2013; CALDEIRA et al., 2014; TRAZZI et al., 2014a, TRAZZI et al., 2014b, CABREIRA et al., 2017). A própria Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE), tem utilizado o lodo de esgoto gerado em suas estações, como substrato para produção de mudas em seus viveiros florestais (ABREU et al., 2017). Este é um uso que pode consumir uma parcela do lodo de esgoto dentro da própria região Metropolitana, visto que esta região abriga 40% dos viveiros florestais do Estado do Rio de Janeiro (ALONSO, 2013).

A região da Baixadas Litorâneas também é de elevada relevância para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto, pois além do lodo gerado em seus municípios, os 96.458 ha aptos aplicação de lodo no solo na região (Tabela 1), poderiam receber lodos de outras grandes cidades do estado, como Rio de Janeiro, Niterói, São Gonçalo e Macaé. Uma vez que, esta região encontra-se geograficamente localizada entre as duas regiões com maior população do Estado, a Metropolitana e a Norte Fluminense (Figura 1).

Os municípios da Baixadas Litorâneas que possuem as maiores áreas aptas a aplicação do lodo de esgoto no solo, são Araruama, com 31.343 ha, Silva Jardim com 19.938 ha e Casimiro de Abreu com 9.821 ha aptas. Esta região possui 11.348 ha ocupados por culturas agrícolas aptas a fertilização com lodo de esgoto, destacando-se os municípios de Araruama,

Silva Jardim e Cabo Frio (Figura 2) e as culturas de maior representatividade na região são cana de açúcar, laranja, banana e coco verde (EMATER, 2014)

Na região Serrana do Rio de Janeiro estão localizados 129.888 ha aptos a reciclagem do lodo de esgoto no solo, o que corresponde a 20,77% de seu território (Tabela 1). Esta é uma região agrícola produtiva e a utilização do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas pode trazer benefícios técnicos e econômicos para os produtores rurais (BITTENCOURT et al., 2014). Esta região possui 11.992 ha cultivados com culturas que podem receber o lodo de esgoto como fertilizante, sendo as principais culturas aptas, banana, café e tomate (EMATER, 2014).

Apesar da região Serrana apresentar 4.003,67 ha de povoamentos florestais, o que representa 21,7% de toda a área de silvicultura do estado, a maioria destes povoamentos encontram-se em áreas de declive acentuado (AMORIM et al., 2012), apresentando restrições legais e operacionais para a fertilização com lodo de esgoto. No entanto, esta região também possui uma área delimitada para implantação de um distrito florestal, totalizando 72.843,10 ha que poderia ser contemplado por planos de reciclagem de lodo de esgoto na região.

Outra potencial utilização do lodo de esgoto nesta região seria como condicionador de solos para minimização de impactos da agricultura migratória no sistema de pousio, muito comum nesta região. O sistema de pousio pode ser definido como uma forma de agricultura marcada pela rotação de pequenas áreas de cultivo, por períodos de atividade curtos (2 a 4 anos), alternados com longos períodos de descanso (5 a 10 anos) e tem grande representação histórica e cultural na região Serrana Fluminense (SILVA, 1996). Neste modelo de agricultura migratória, o tempo de pousio tem influência na sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, pois períodos longos de pousio para recuperação da fertilidade do solo podem inviabilizar o sistema, visto que demandaria maiores áreas de produção e aumento de custos referentes à limpeza do terreno (CORREIA et al., 2004).

O lodo de esgoto pode ser aplicado ao final do ciclo de produção, como condicionador, acelerando a recuperação das características químicas, físicas e biológicas do solo durante o período de pousio, principalmente o aporte de matéria orgânica, que é tido como um dos principais indicadores de qualidade neste sistema (BENITES et al. 2010). Com um menor tempo de pousio, é possível otimizar a área de produção sem a necessidade de suprimir novas áreas de floresta. Pela legislação, solos tratados com lodo de esgoto podem receber quaisquer culturas após 48 meses, e como o tempo de pousio varia de 5 a 10 anos, não haveria restrições de uso da terra após o período de recuperação (BRASIL, 2006).

A reciclagem agrícola e florestal do lodo de esgoto poderia trazer benefícios tanto para as empresas de saneamento, que diminuiriam seus custos de disposição final em aterros sanitários e estariam dispendo seus resíduos de forma mais sustentável, como também para os produtores rurais, que poderiam aumentar sua produção e diminuir seus custos com insumos. Bittencourt et al. (2014) analisaram a reciclagem agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná, que contemplou de 2007 a 2010 mais de 2.200 hectares de áreas agrícolas, e concluíram que os 80 produtores participantes do programa de reciclagem economizaram em média U\$\$ 813,45 ha⁻¹, em aquisição de fertilizantes e condicionadores de solo.

Tanto a espacialização da área apta a aplicação de lodo de esgoto ao solo, como as culturas e municípios com maior potencial para receber este material, são importantes dados para subsidiar a criação de políticas públicas visando aproveitar melhor este resíduo rico em matéria orgânica e nutrientes. Para um melhor detalhamento do potencial de reciclagem do lodo de esgoto no estado, deve-se ainda definir o uso e ocupação do solo nos locais compreendidos como aptos à aplicação do lodo de esgoto.

4. CONCLUSÕES

O estado do Rio de Janeiro possui elevado potencial para a reciclagem no uso agrícola e florestal do lodo de esgoto, visto que apresenta grandes áreas aptas a aplicação de lodo no solo. Além disso, 86,5% de toda a área agrícola do estado do Rio de Janeiro é cultivada com culturas que não possuem restrições legais a fertilização com lodo de esgoto, o que poderia beneficiar tanto produtores rurais, como as empresas geradoras de lodo. A perspectiva de crescimento do setor florestal através da implantação dos distritos florestais pode ser de grande oportunidade para traçar uma estratégia de reciclagem florestal do lodo de esgoto no Estado.

5. REFERÊNCIAS

ABREU, A. H.M., LELES, P. S. S., ALONSO, J. M., ABEL, E. L. S., OLIVEIRA, R. R. Characterization of sewage sludge generated in Rio de Janeiro , Brazil , and perspectives for agricultural recycling, **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4, p. 2433 – 2448, 2017a.

Falta ABREU et al 2017b

ALONSO, J. M. **Análise dos viveiros e da legislação brasileira sobre sementes e mudas florestais nativas no estado do Rio de Janeiro**. 2013. Dissertação (Mestrado Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

AMORIM, H. B.; FRANCELINO, M. R.; MOURA, T. A.; CAPITANO, R. Estimativa da área ocupada por reflorestamentos no Estado do Rio de Janeiro. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 27-32, 2012.

ANDREOLI, C.; GARBOSSA, L.; LUPATINI, G.; PEGORINI, S. “**A Brazilian approach in United Nations Human Settlements Programme**”, in LeBLANC, R.; MATTHEWS, P.; ROLAND, P. (eds). *Global Atlas of Excreta Wastewater Sludge, and Biosolids Management: Moving Forward the Sustainable and Welcome Uses of a Global Resource*. UN-Habitat, Nairobi, p. 31 – 46.

BENITES, M. V.; MOUTTA, R. O.; COUTINHO, H. L. C.; BALIEIRO, F. C. Análise discriminante de solos sob diferentes usos em área de mata atlântica a partir de atributos da matéria orgânica. **Revista Árvore**, v. 34, n. 1, p. 685 – 690, 2010.

BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; GOMES, D. Sewage sludge usage in agriculture: a case study of its destination in the Curitiba Metropolitan REGION, Paraná, Brazil. **Water Air and Soil Pollution**, v. 225, p.1 – 8, 2014.

BITTENCOURT, S.; AISSE, M. M.; SERRAT, B. M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 1129 – 1139, 2017.

BONINI, C.S.B. ; ALVES, M.C ; MONTANARI, R. Lodo de Esgoto e Adubação Mineral na Recuperação de Atributos Químicos de Solo Degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.4, p. 388-393, 2015.

BOURIOUG, M.; GIMBERT, F.; ALAOU-SEHMER, L. BENBRAHIM, M.; ALEYA, L.; SOSSÉ, B. A. Sewage sludge application in a plantation: Effects on trace metal transfer in

soil – plant – snail continuum. **Science of the Total Environment**, Califórnia, v. 503, p. 309-314, 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução – CONAMA. Resolução no 375/2006. **Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados**. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, n. 167, p. 141-146, 30 ago 2006.

CALDEIRA, M.V.; DELARMELINA, W.M.; PERONI, L.; GONÇALVES, E.O.; SILVA, A.G. Lodo de Esgoto e Vermiculita na Produção de Mudanças de Eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v.43, n.2, p.155-163, 2013.

CALDEIRA, M.V.W.; FAVALESSA, M.; GONÇALVES, E.O.; DELARMELINA, W.M.; SANTOS, F.E.V.; VIEIRA, M. Lodo de Esgoto Como Componente de Substrato para produção de mudas de Acacia Mangium Wild. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. v.5, n.1, p.34-43, 2014.

CEPERJ

<http://www.ceperj.rj.gov.br/ceep/info_territorios/divis_politico_administrativo.html>

CHIBA, M. K.; MATTIAZZO, M. E.; OLIVEIRA, F. C. Cultivo de cana de açúcar em Argissolo tratado com lodo de esgoto. I – disponibilidade de nitrogênio no solo e componentes de produção. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, Viçosa, v. 32, p. 643 – 652, 2008.

CORREIA, M. E. F.; REIS, L. L.; CAMPELLO, E. F. C.; FRANCO, A. A. **Populações da macrofauna do solo em agricultura itinerante na região da Mata Atlântica, RJ**. 62-75 pp. In: CAMPELLO, E. F. C. (ed.). Seminário sobre Agricultura Migratória na Região Serrana do Rio de Janeiro. Seropédica: EMBRAPA-Agrobiologia, 2004; 86p

EMATER – EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO RIO DE JANEIRO - **Acompanhamento Sistemático da Produção Agrícola**, Ano 2014. Disponível em <http://www.emater.rj.gov.br/images/ASPA2014_MUN_SITE.htm> Acesso em 24 de maio 2016.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - **Mapa de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do estado do Rio de Janeiro**, Ano 2005. Disponível em <http://mapoteca.cnps.embrapa.br/geoacervo/det_mapa.aspx>. Acesso em 19 de maio de 2016.

ERDOGAN, R.; ZAIMOGLU, Z.; BUDAK, F.; KOSEOGLU, C. Use of sewage sludge in growth media for ornamental plants and its effects on growth and heavy metal accumulation. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v.9, n.2, p. 632 – 635, 2011.

EUROSTAT – European Commission of Statistics – **Sewage sludge production and disposal from urban wastewater**, Ano 2015. Disponível em <<http://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>>. Acesso em 28 de maio de 2016.

FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N. et al. Effect of lime and sewage sludge fertilisation on tree and understory interaction in a silvopastoral system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 188, p. 72-79, 2014.

INTARAKOSIT, E. **GIS-based odor impact assessment from biosolids land application sites**. Tese (Pós-Doutorado). University of Maryland, College Park, 2010

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

LIMA, F. A. **Determinação de áreas potenciais à aplicação de lodo de esgoto como insumo agrícola utilizando geoprocessamento**. 65p., Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias). Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.

LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H.; BULL, L. T. Efeito do nitrogênio e do lodo de esgoto nos fatores produtivos do feijoeiro. **Ceres**, v. 59, n. 1, p. 118 – 124, 2012.

MOSQUERA-LOSADA, M. R. et al. Residual effects of lime and sewage sludge inputs on soil fertility and tree and pasture production in a *Pinus radiata* D. Don silvopastoral system established in a very acidic soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 161, p. 165-173, 2012. DOI: 10.1016/j.agee.2012.08.001.

PASSUELLO, A.; CADIACH, O.; PEREZ, Y.; SCHUHMACHER, M. A spatial multicriteria decision making tool to define the best agricultural areas for sewage sludge amendment. **Environment International**, v. 38, p. 1-9. 2011

PERS - **Plano estadual de resíduos sólidos do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: SEA / INEA, 2014, 137 p.

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

SAMPAIO, T.F.; GUERRINI, I.A.; OTERO, X.L.; VAZQUEZ, F.M.; BOGIANI, J.C.; OLIVIEIRA, F.C.; MARCIA, J.L.G.; CIOL, M.A.; LITTKKE, K.M.; HARRISON, R.B. The Impact of Biosolid Application on Soil and Native Plants in a Degraded Brazilian Atlantic Rainforest Soil. **Water Air and Soil Pollution** v.227, n.1, p1-10, 2016.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; MENDONÇA, E. Cana de açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n.1, p. 1- 8, 1998.

SILVA, L. F. **Solos Tropicais: aspectos pedológicos, ecológicos e de manejo**. Ed: Terra Brasilis/ SP; 1996.

TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; REIS, E. F.; SILVA, A. G. Produção de mudas de *Tectona grandis* em substratos formulados com biossólido. **Cerne**, v.20, n.2, p. 293 – 302, 2014.

VASKAN, P.; PASSUELO, A.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G.; SCHUHMACHER, M. Combined use of GIS and mixed-integer linear programming for identifying optimal

agricultural areas for sewage sludge amendment: A case study of Catalonia. **Environmental Modelling and Software**, v.46, p. 163 – 169, 2013.

XUE, J.; KIMBERLEY, M.O.; ROSS, C.; GIELEN, G.; TREMBLAY, L.A.; CHAMPEAU, O.; HORSWELL, J.; WANG, H. Ecological Impacts of Long-Term Application of Biosolids to a Radiata Pine Plantation. **Science Total Environment**., v. 530, p. 233-240, 2015.

CONCLUSÃO GERAL

De forma geral, os lodos de esgoto gerado na região metropolitana do Rio de Janeiro apresenta elevado teor de nutrientes e matéria orgânica, e enquadraram-se nos parâmetros de metais pesados, agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos estipulados pela resolução CONAMA n° 375/2006, sendo classificados como classe “A” e com atributos favoráveis para a reciclagem agrícola e florestal.

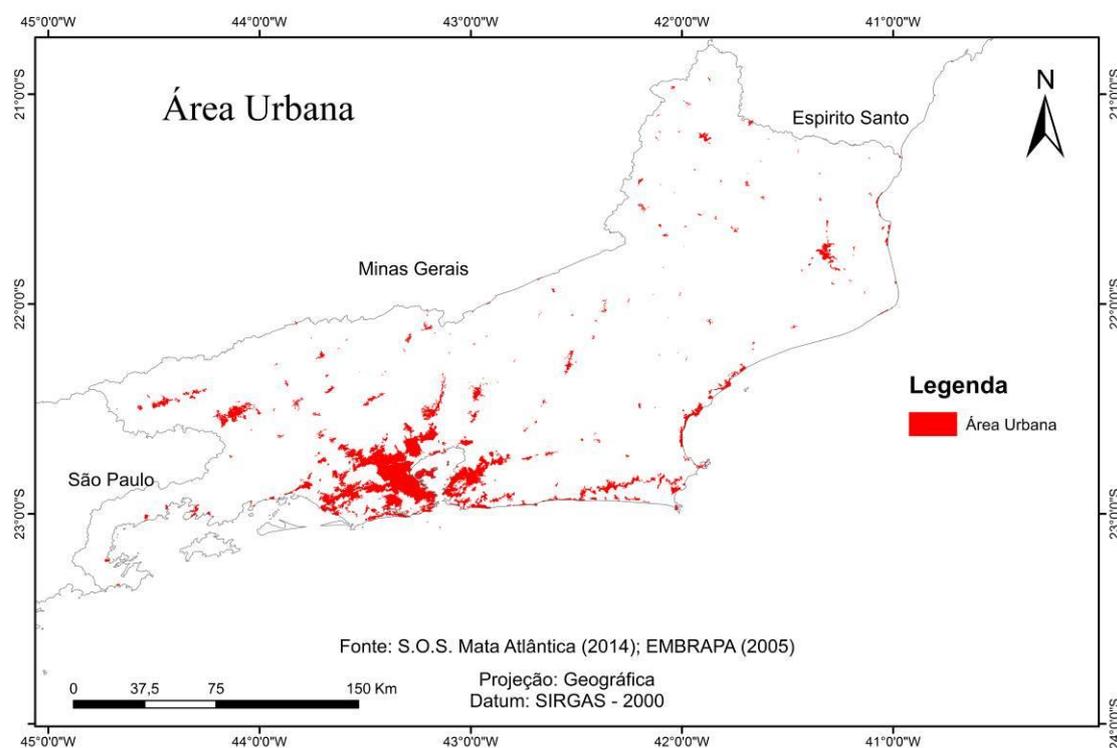
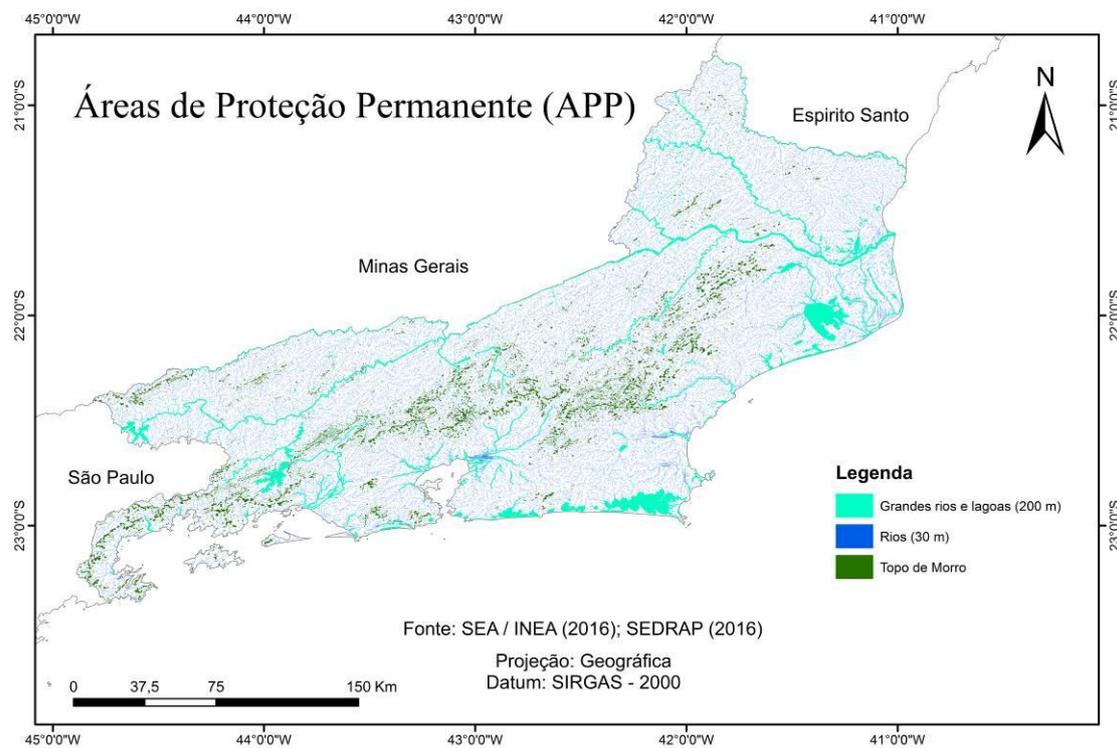
O panorama agrícola do estado do Rio de Janeiro se mostra favorável para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto, visto que existe uma grande demanda potencial e dentre as dez culturas agrícolas com maior área plantada no estado, em oito pode-se utilizar o lodo como fertilizante ou condicionador de solos.

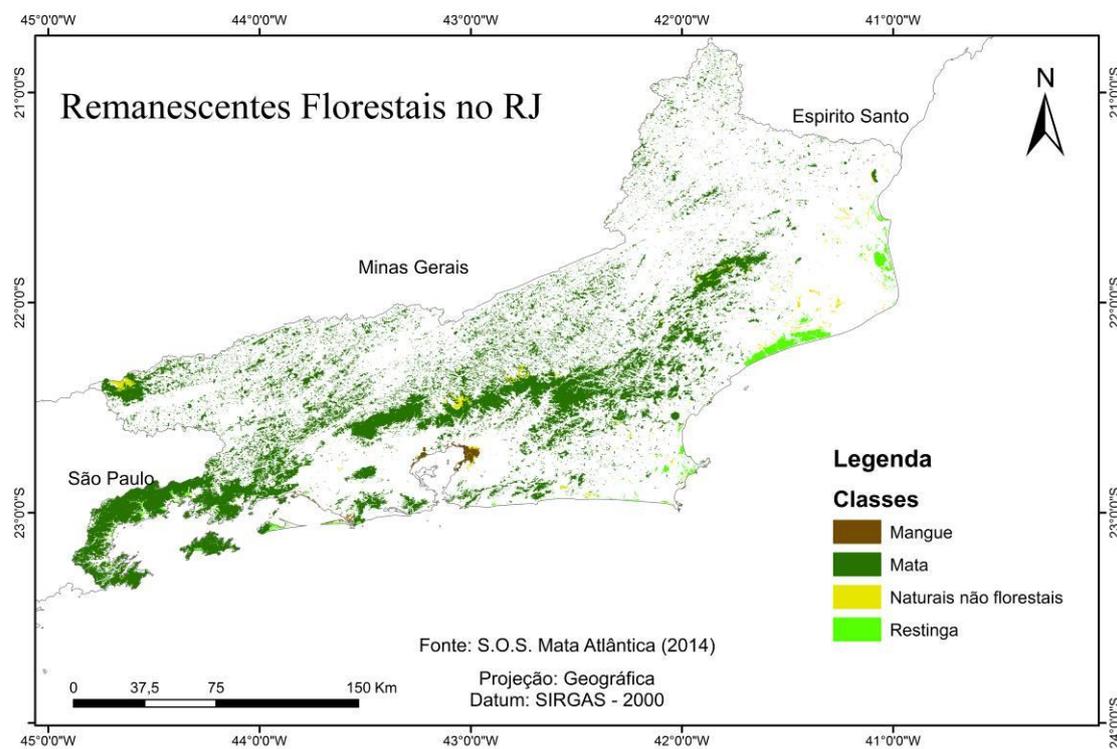
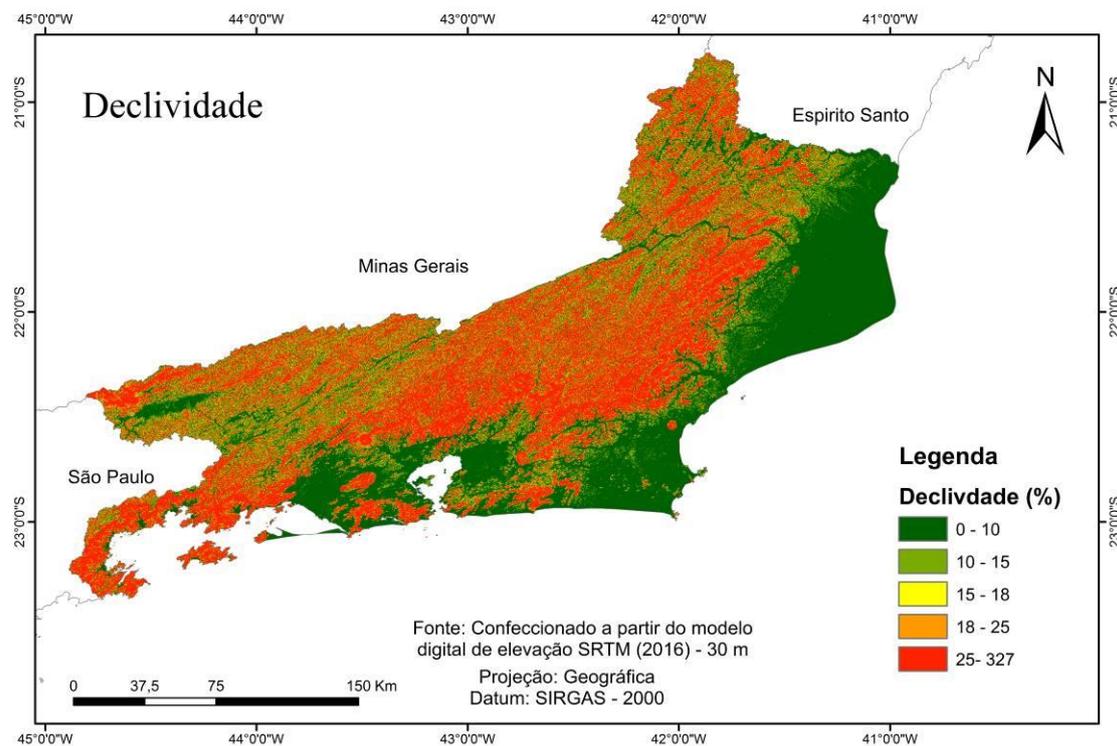
Os lodos apresentaram elevado valor agregado com base no potencial fertilizador, com média de R\$ 252,56 a R\$ 390,94 t^{-1} de valor agregado em matéria orgânica e NPK. O alto valor de mercado de substratos orgânicos e condicionadores de solo, aliado ao potencial do lodo de esgoto para estas finalidades, demonstram que este também pode ser um mercado a ser preenchido pelo lodo de esgoto.

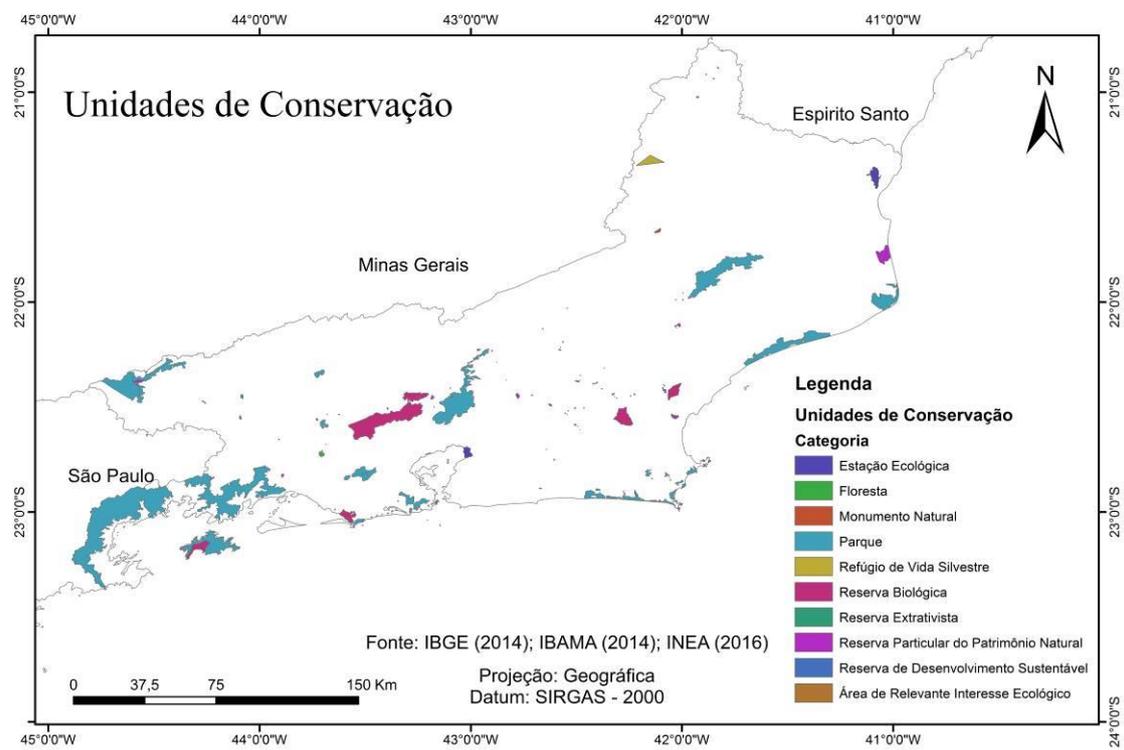
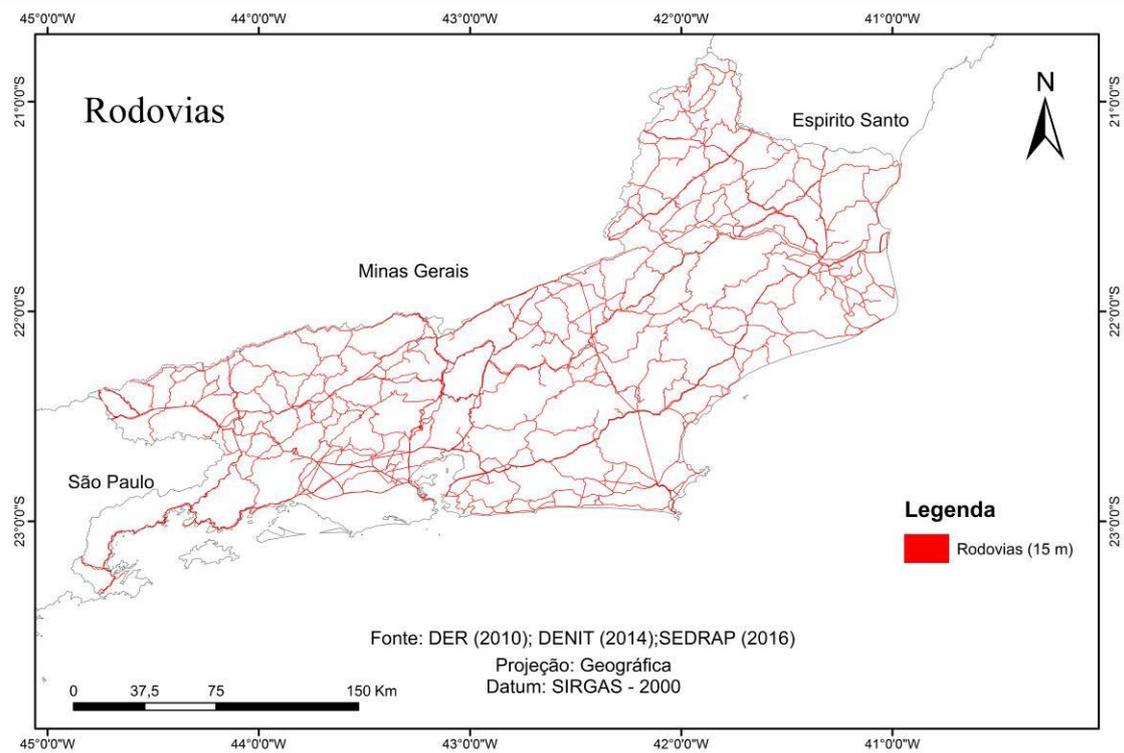
As áreas do estado do Rio de Janeiro que podem receber aplicação de lodo de esgoto no solo somam 1.270.740 ha, totalizando 32,25 % da área do estado. A região com maior potencial para reciclagem agrícola do lodo de esgoto é a região norte fluminense, que além de grandes áreas aptas a aplicação de lodo de esgoto, também possui a maior área agrícola do estado.

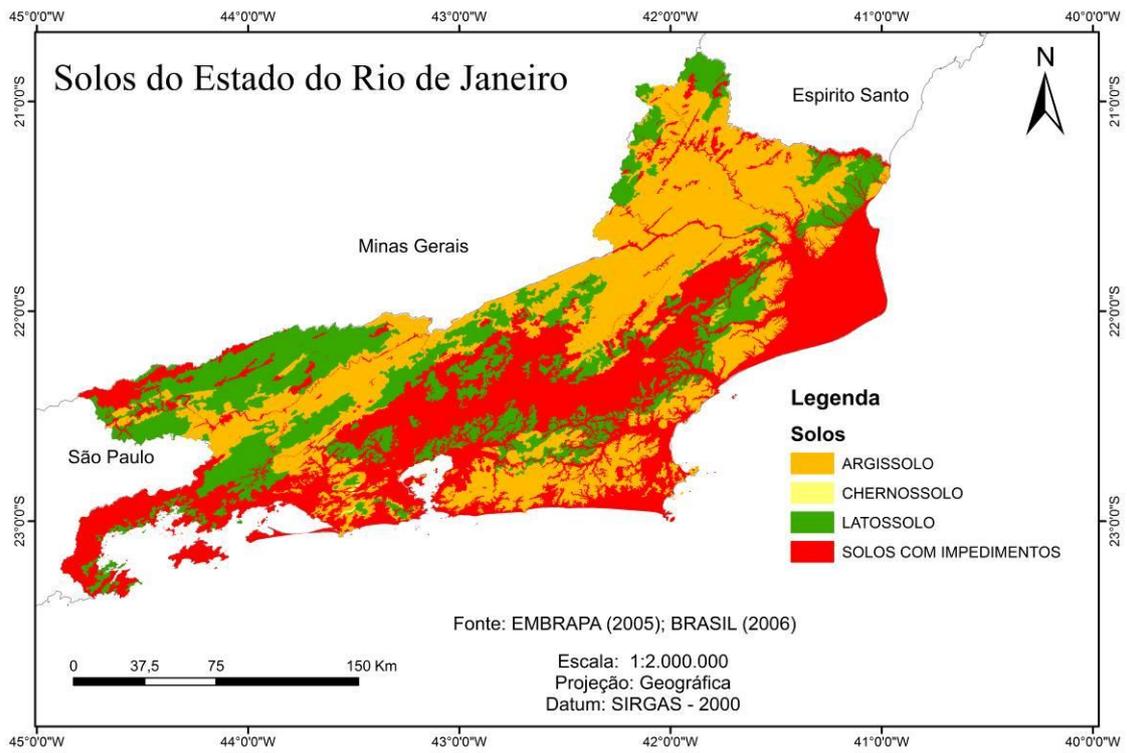
Os resultados deste trabalho reforçam a necessidade de encontrar métodos de disposição mais sustentáveis para este resíduo, que pode beneficiar tanto produtores rurais, que podem minimizar seus custos de produção, como os geradores de lodo, que passam a dispor seus resíduos de forma mais sustentável. A reciclagem do lodo de esgoto pode trazer benefícios econômicos, sociais e ambientais para os setores agrícola e florestal fluminense.

ANEXOS I – MAPAS BÁSICOS









ANEXO II – Área apta a aplicação de lodo de esgoto em municípios do Rio de Janeiro

Município	Região	Área do Município (ha)	Área inapta (ha)	Área apta (ha)	Apta (%)
Angra dos Reis	Costa Verde	73.487	71.416	2.071	2,82
Aperibé	Noroeste	8.541	3.841	4.700	55,02
Araruama	Baixadas Litorâneas	57.362	26.019	31.343	54,64
Areal	Centro sul	9.951	7.203	2.749	27,62
Armação dos Búzios	Baixadas Litorâneas	6.279	4.756	1.523	24,26
Arraial do Cabo	Baixadas Litorâneas	14.140	14.078	62	0,44
Barra do Piraí	Médio Paraíba	52.461	24.072	28.389	54,11
Barra Mansa	Médio Paraíba	49.240	19.748	29.492	59,89
Belford Roxo	Metropolitana	6.999	6.060	939	13,42
Bom Jardim	Serrana	34.608	26.373	8.235	23,79
Bom Jesus do Itabapoana	Noroeste	53.936	30.389	23.547	43,66
Cabo Frio	Baixadas Litorâneas	36.961	30.370	6.591	17,83
Cachoeiras de Macacu	Metropolitana	86.109	68.376	17.733	20,59
Cambuci	Noroeste	50.754	31.370	19.384	38,19
Campos dos Goytacazes	Norte	364.650	228.476	136.174	37,34
Cantagalo	Serrana	67.753	37.461	30.292	44,71
Carapebus	Norte	27.673	10.919	16.754	60,54
Cardoso Moreira	Norte	46.531	19.476	27.055	58,14
Carmo	Serrana	27.534	16.968	10.566	38,37
Casimiro de Abreu	Baixadas Litorâneas	41.787	31.966	9.821	23,50
Comendador Levy Gasparian	Centro sul	9.787	5.410	4.377	44,72
Conceição de Macabú	Norte	30.398	19.479	10.919	35,92
Cordeiro	Serrana	10.045	6.448	3.597	35,81
Duas Barras	Serrana	33.795	25.406	8.389	24,82
Duque de Caxias	Metropolitana	41.861	37.775	4.086	9,76
Engenheiro Paulo de Frontin	Centro sul	12.678	8.354	4.324	34,11
Guapimirim	Metropolitana	32.163	27.598	4.565	14,19
Iguaba Grande	Baixadas Litorâneas	4.458	2.899	1.558	34,96
Itaboraí	Metropolitana	38.605	19.457	19.148	49,60
Itaguaí	Metropolitana	25.117	21.890	3.227	12,85
Italva	Noroeste	26.260	10.299	15.961	60,78
Itaocara	Noroeste	38.648	14.732	23.916	61,88
Itaperuna	Noroeste	99.525	51.477	48.047	48,28
Itatiaia	Médio Paraíba	21.564	16.716	4.848	22,48

Município	Região	Área do Município (ha)	Área inapta (ha)	Área apta (ha)	Apta (%)
Japeri	Metropolitana	7.382	4.331	3.051	41,33
Lajes do Muriaé	Noroeste	22.917	14.222	8.695	37,94
Macaé	Norte	109.540	82.957	26.583	24,27
Macuco	Serrana	6.989	4.291	2.697	38,60
Magé	Metropolitana	35.146	29.375	5.771	16,42
Mangaratiba	Costa Verde	33.280	32.249	1.031	3,10
Maricá	Metropolitana	32.657	26.594	6.063	18,57
Mendes	Centro sul	8.658	4.606	4.052	46,80
Mesquita	Metropolitana	3.746	3.669	77	2,04
Miguel Pereira	Centro sul	26.021	22.519	3.502	13,46
Miracema	Noroeste	27.350	12.782	14.568	53,26
Natividade	Noroeste	34.789	21.853	12.936	37,18
Nilópolis	Metropolitana	1.738	1.651	86	4,97
Niterói	Metropolitana	12.110	10.508	1.602	13,23
Nova Friburgo	Serrana	84.012	78.363	5.649	6,72
Nova Iguaçu	Metropolitana	46.725	38.252	8.473	18,13
Paracambi	Metropolitana	16.959	11.087	5.872	34,63
Paraíba do Sul	Centro sul	53.271	26.308	26.963	50,61
Paraty	Costa Verde	83.656	81.116	2.540	3,04
Paty do Alferes	Centro sul	26.603	10.615	15.988	60,10
Petrópolis	Serrana	71.346	65.409	5.936	8,32
Pinheiral	Médio Paraíba	7.389	3.082	4.308	58,29
Piraí	Médio Paraíba	44.249	24.208	20.041	45,29
Porciúncula	Noroeste	27.424	14.730	12.694	46,29
Porto Real	Médio Paraíba	4.578	2.944	1.634	35,69
Quatis	Médio Paraíba	25.709	12.473	13.236	51,48
Queimados	Metropolitana	6.881	4.360	2.521	36,64
Quissamã	Norte	65.000	52.147	12.854	19,77
Resende	Médio Paraíba	99.000	59.998	39.002	39,40
Rio Bonito	Metropolitana	41.621	20.471	21.151	50,82
Rio Claro	Médio Paraíba	76.022	60.846	15.176	19,96
Rio das Flores	Médio Paraíba	42.998	23.526	19.472	45,29
Rio das Ostras	Baixadas Litorâneas	20.615	11.658	8.957	43,45
Rio de Janeiro	Metropolitana	108.046	100.678	7.368	6,82
Santa Maria Madalena	Serrana	73.501	58.718	14.784	20,11
Santo Antônio de Pádua	Noroeste	54.296	23.982	30.314	55,83
São Fidélis	Norte	93.105	59.606	33.499	35,98
São Francisco de Itabapoana	Norte	99.343	41.391	57.952	58,34
São Gonçalo	Metropolitana	22.342	16.226	6.115	27,37
São João da Barra	Norte	40.841	40.534	307	0,75
São João de Meriti	Metropolitana	3.149	3.149	0	0,00

Município	Região	Área do Município (ha)	Área inapta (ha)	Área apta (ha)	Apta (%)
São José de Ubá	Noroeste	22.579	11.448	11.131	49,30
São José do Vale do Rio Preto	Serrana	19.869	15.753	4.116	20,72
São Pedro da Aldeia	Baixadas Litorâneas	30.389	22.136	8.252	27,16
São Sebastião do alto	Serrana	35.771	19.828	15.942	44,57
Sapucaia	Centro sul	48.795	35.263	13.532	27,73
Squarema	Baixadas Litorâneas	31.790	23.378	8.412	26,46
Seropédica	Metropolitana	23.861	17.178	6.684	28,01
Silva Jardim	Baixadas Litorâneas	84.287	64.349	19.938	23,66
Sumidouro	Serrana	37.169	32.035	5.134	13,81
Tanguá	Metropolitana	12.760	5.822	6.938	54,37
Teresópolis	Serrana	69.420	61.450	7.971	11,48
Trajano de Moraes	Serrana	52.907	46.326	6.581	12,44
Três Rios	Centro sul	28.838	16.086	12.752	44,22
Valencia	Médio Paraíba	117.176	65.398	51.778	44,19
Varre-Sai	Noroeste	17.130	8.537	8.593	50,16
Vassouras	Centro sul	48.453	21.163	27.290	56,32
Volta Redonda	Médio Paraíba	16.429	8.631	7.798	47,46
Total (ha)		3.940.286	2.669.546	1.270.740	32,25