

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO, CARREGAMENTO E
TRANSPORTE DO LODO DE ESGOTO**

NÚRIA ROSA GAGLIARDI QUINTANA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP

Junho - 2010

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO, CARREGAMENTO E
TRANSPORTE DO LODO DE ESGOTO**

NÚRIA ROSA GAGLIARDI QUINTANA

Orientador: Prof. Dr. Osmar de Carvalho Bueno

Co-orientador: Prof. Dr. Wanderley José de Melo

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP

Junho - 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Q7a Quintana, Núria Rosa Gagliardi, 1979-
Análise energética da produção, carregamento e transporte do lodo de esgoto / Núria Rosa Gagliardi Quintana. - Botucatu : [s.n.], 2010.
xii, 58 f. : tabs., il. color.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2010
Orientador: Osmar de Carvalho Bueno
Co-orientador: Wanderley José de Melo
Inclui bibliografia.

1. Tratamento de esgoto. 2. Biossólido. 3. Eficiência energética. 4. Balanço energético. 5. Custo de transporte. I. Bueno, Osmar de Carvalho. II. Melo, Wanderley José de. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO, CARREGAMENTO E
TRANSPORTE DO LODO DE ESGOTO"

ALUNA: NURIA ROSA GAGLIARDI QUINTANA

ORIENTADOR: PROF. DR. OSMAR DE CARVALHO BUENO

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. OSMAR DE CARVALHO BUENO



PROF. DR. ELIAS JOSÉ SIMÓN



PROFA. DRA. MAURA SEIKO T. ESPERANCINI



PROF. DR. GERSON HENRIQUE DA SILVA



PROFA. DRA. ANDREA ELOISA BUENO PIMENTEL

Data da Realização: 07 de junho de 2010.

Ao meu esposo Rodrigo, e à nossa filha Isadora...

DEDICO

Aos meus pais, meu avô Angelo e minha irmã Nina...

OFEREÇO

“Ou o século XXI é dedicado aos valores humanos, morais e éticos...
ou de nada valerem os avanços tecnológicos conquistados até aqui”.

Gilson Luiz Volpato

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores: Professor Doutor Osmar de Carvalho Bueno e Professor Doutor Wanderley José de Melo.

Aos funcionários e servidores da Estação de Tratamento de Esgotos de Franca.

Ao Engenheiro Agrônomo Milton C. Pucci

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia “Energia na Agricultura”.

À CAPES.

À Seção de Pós-Graduação.

Aos professores e funcionários do Departamento de Gestão e Tecnologia Agroindustrial.

À todos os funcionários da Biblioteca “Prof. Paulo de Carvalho Mattos”.

Às bancas de qualificação e defesa.

Agradeço ainda,

À Deus, sempre tão presente em minha vida!

Aos meus familiares e amigos...

À minha mãe pelo apoio e colaboração nas horas mais necessárias.

Ao meu esposo Rodrigo, pelo companheirismo e toda colaboração...

E à nossa filhinha Isadora, que me revelou o meu melhor!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XI
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO.....	5
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
4.1 O tratamento de esgotos.....	7
4.1.1 Importância do tratamento de esgotos	7
4.1.2 Geração de lodo de esgoto	8
4.2 O lodo de esgoto	9
4.2.1 Características do lodo de esgoto.....	9
4.2.1.1 Agentes patogênicos	9
4.2.1.2 Metais pesados.....	10
4.2.2 Uso agrícola	12
4.2.2.1 Legislação	12
4.2.2.2 Influências do lodo de esgoto nas propriedades do solo.....	15
4.2.2.3 Produtividade do lodo de esgoto como biofertilizante	16
4.2.2.4 Avaliação econômica do lodo de esgoto como biofertilizante	17
4.2.2.5 Análise energética do lodo de esgoto como biofertilizante	18
4.3. O transporte do lodo de esgoto	19
4.3.1 Legislação	19
4.3.2 Custo	20
4.4. Análise energética.....	21
4.4.1 Crise energética.....	21
4.4.2 Classificação da energia.....	22
4.4.3 Energia e sustentabilidade	23
4.4.4 Energia e lodo de esgoto	24
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
5.1 Área de estudo	25
5.2 O processo de tratamento de esgotos na ETE de Franca	26
5.3 Caracterização do lodo de esgoto	29

5.3.1 Parâmetros agronômicos.....	29
5.3.2 Metais pesados.....	30
5.4 Coeficientes energéticos.....	30
5.4.1 Lodo de esgoto.....	30
5.4.2 Fertilizantes químicos.....	31
5.4.3 Mão de obra.....	31
5.4.4 Máquinas e equipamentos.....	32
5.4.5 Combustíveis, lubrificantes e óleos.....	33
5.5 Cálculo do custo de transporte.....	33
5.6 Análise energética.....	34
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
6.1 Análise energética.....	37
6.1.1 Entradas energéticas.....	37
6.1.1.1 Tratamento de esgoto.....	37
6.1.1.2 Tratamento de lodo de esgoto.....	39
6.1.1.3 Carregamento.....	41
6.1.1.4 Transporte.....	42
6.1.2 Balanço Energético.....	42
6.1.3 Eficiência Energética.....	44
6.2 Custo de transporte x Valor do fertilizante transportado.....	45
7 CONCLUSÕES.....	47
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1 Classificação do lodo de esgoto de acordo com a quantidade de agentes patogênicos.....	09
2 Concentração máxima permitida de substâncias inorgânicas no lodo de esgoto.....	11
3 Cargas acumuladas permitidas de substâncias inorgânicas pela aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas.....	14
4 Dados dos equipamentos utilizados no tratamento de esgotos de Franca (Cia. de Saneamento Básico do Estado de São Paulo/SABESP).....	29
5 Participação energética, por fonte, forma e total, setor 1 do tratamento de esgoto (MJ).....	37
6 Participação energética, por fonte, forma e total, setor 2 do tratamento de esgoto (MJ).....	37
7 Participação energética, por fonte, forma e total, setor 3 do tratamento de esgoto (MJ).....	38
8 Participação energética, por fonte, forma e total, setor 4 do tratamento de esgoto (MJ).....	38
9 Participação energética, por fonte, forma e total, setor 5, do tratamento de lodo (MJ).....	39
10 Participação energética, por fonte, forma e total, setor 6 do tratamento de lodo (MJ).....	39
11 Participação energética, por fonte, forma e total, setor 7 do tratamento de lodo (MJ).....	40
11 Continuação da Tabela 11.....	40
12 Participação energética, por fonte, forma e total, setor 8 do tratamento de lodo (MJ).....	41
13 Participação energética, por fonte, forma e total, no carregamento do lodo de esgoto (MJ).....	41
14 Participação energética, por fonte, forma e total, transporte do lodo de esgoto (MJ).....	42
15 Balanço energético de tratamento de esgoto, tratamento, carregamento e transporte de lodo.....	43
16 Eficiência energética de tratamento de esgoto, tratamento, carregamento e transporte de lodo.....	44
17 Quantidades em massa, energia e preço de N, P ₂ O ₅ e K ₂ O fornecidos por uma tonelada de lodo de esgoto, com base no peso seco a 70°C e corrigido para peso seco (100°C) e transportados por um caminhão com capacidade de carga de 16 toneladas.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	O processo de tratamento de esgotos na ETE de Franca.....	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

APA: Área de Proteção Ambiental

APP: Área de Preservação Permanente

APM(s): Área de Proteção aos Mananciais

bs: base seca

cal: caloria (s)

cm: centímetro (s)

COMPESA: Companhia Pernambucana de Saneamento

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CTC: Capacidade de Troca de Cátions

cv: cavalo-vapor

DE: Depreciação Energética

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto

Eq.: equação

FAO: Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

h: hora

ha: hectare (s).

J: Joule

K: potássio

kcal: quilocaloria (s)

kg: quilograma (s)

km: quilometro

K₂O: óxido de potássio

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS
(continuação)

LE: lodo de esgoto

m: metro (s)

m³: metro cúbico

MB: metabolismo basal

mg: miligrama(s)

MJ: mega Joule

N: nitrogênio

NMP: Número Mais Provável

P: fósforo

pH: potencial hidrogeniônico

P₂O₅: pentóxido de fósforo

SABESP: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SI: Sistema Internacional

ST: Sólidos Totais

t ha⁻¹: toneladas por hectare

t: tonelada (s)

UFF: Unidade Formadora de Foco

UFP: Unidade Formadora de Placa

UGL: Unidade Geradora de Lodo

UNESP: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

V%: saturação por bases

1 RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o fluxo de energia no tratamento de esgoto e de lodo de esgoto na ETE de Franca. Para tanto, levantaram-se os dados de todo maquinário utilizado na Estação, tais como: quantidade, potência, vida útil, peso das máquinas, consumo de graxa e/ou lubrificantes e mão de obra empregada. O consumo de energia elétrica na Estação foi calculado para cada máquina separadamente. Com isso, calculou-se a participação energética, por fonte, forma e total, de todos os setores de tratamento. Por meio dos resultados, observou-se que tanto o tratamento de esgoto como o tratamento de lodo utilizam expressivamente energia industrial na forma de eletricidade, o que parece vantajoso, visto que essa é uma fonte renovável de energia. Para o cálculo do fluxo de energia no carregamento e transporte do lodo, obtiveram-se os dados de vida útil, peso, consumo de graxa e/ou lubrificantes da retroescavadeira e do caminhão, e mão de obra empregada nessas atividades. Ao contrário do observado nos tratamentos de esgoto e lodo, essas atividades usam principalmente energia fóssil na forma de óleo diesel. Além disso, com a quantidade de N, P e K contidas no lodo de esgoto foi possível calcular a energia e o preço

dos fertilizantes contidos em uma tonelada do material. De acordo com os resultados, uma tonelada de lodo de esgoto produzida em Franca contém 5.081,53 MJ de energia e R\$102,47 de fertilizantes químicos. Portanto, um caminhão com capacidade de carga de 16 toneladas transporta 81.304,62 MJ de energia e R\$1.639,55 de fertilizante, o que justifica a distribuição desse material no raio de 25 km, que é a distância média entre a ETE e os potenciais locais de aplicação do material. Por fim, calculou-se o balanço e a eficiência energética de todas as atividades estudadas, de forma que os resultados apontaram serem todas, energeticamente sustentáveis.

Palavras-chave: tratamento de esgoto; biossólido; balanço energético; eficiência energética; custo de transporte.

ENERGETIC ANALYSIS OF PRODUCTION, LOADING AND TRANSPORTATION OF SEWAGE SLUDGE. Botucatu, 2010. 58 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: NÚRIA ROSA GAGLIARDI QUINTANA

Adviser: OSMAR DE CARVALHO BUENO

Co- Adviser: WANDERLEY JOSÉ DE MELO

2 SUMMARY

This study assessed the energy flux on the processing of sewage and sewage sludge in the Sludge Treatment Station of Franca City, São Paulo State, Brazil. For this, data concerning ETE machinery was quantified, such as: quantity, potency, life span and weight, as well as, mineral greases and/or lubricants consumption and the used workforce. Based on this, energy expenditure was calculated, regarding energy source and type and the total expenditure of all parties involved in sewage processing. These results allowed to conclude that either sewage or sewage sludge processing have a high demand of industrial energy in the form of electricity, what is advantageous, since it is a renewable energy source. For the energy flux calculations during loading and transportation, data of life span, weight, the consumption of lorries and backhoes mineral greases and lubricants and the used workforce was considered. On the contrary, during sewage sludge processing activities, fossil energy in the form of diesel oil was the main utilized. Moreover, considering the amount of N, P and K in the sludge, the energy and price of fertilizers could be calculated in 1 ton of sewage sludge. Accordingly to calculations, a ton of sewage sludge produced on Franca's ETE has 5,081.53 MJ of energy and R\$102.47 of chemical fertilizers. Thus, a lorry of 16-ton storage capacity transports 81,304.62 MJ of energy and R\$1,639.55 of fertilizers, justifying the distribution of the sewage sludge on 25-km ray distance, what is a viable distance, because it

is the mean distance between Franca's ETE and the farms that potentially could use this material. Finally, the balance and energetic efficiency of all activities approached in this study could be calculated, indicating energetic sustainability of those.

Key-words: sludge treatment; biosolid; energetic balance; energetic efficiency; transport cost.

3 INTRODUÇÃO

O tratamento adequado de esgotos permite, além da conservação dos recursos naturais, a manutenção da saúde pública através da eliminação de focos de contaminação e poluição.

No entanto, os processos que possibilitam o retorno da água no ambiente geram o lodo de esgoto, e conseqüentemente, outro problema que é a destinação correta deste resíduo.

Dentre as alternativas possíveis, podem ser citadas: aterros sanitários e aplicação em áreas agrícolas e florestais.

O depósito em aterros sanitários exige muita cautela durante sua construção e manutenção, o que pode encarecer essa prática. Por outro lado, a aplicação agrícola é bem vista por alguns produtores, pois o lodo de esgoto apresenta quantidade de matéria orgânica e macro e micronutrientes capaz de beneficiar o desenvolvimento da

vegetação e a recuperação de solos. Além disso, este biofertilizante utilizado em substituição parcial ao fertilizante mineral diminuiria os custos da fertilização.

Paralelamente, a agricultura, assim como qualquer outra atividade econômica, atravessa a atual crise energética. Isso ocorre porque os sistemas de produção agrícola precisam ser energeticamente sustentáveis.

Com isso, além das implicações ambientais e econômicas, os ganhos energéticos trazidos pela aplicação do lodo de esgoto podem ser um caminho para balanços positivos na produção agrícola.

Vários estudiosos afirmam que uma maneira de aumentar a eficiência energética da agricultura seria a redução da entrada de energia fóssil relacionada à aplicação de fertilizantes.

De fato, os gastos energéticos de várias culturas indicam grande consumo de energia de fonte não renovável, como os fertilizantes químicos.

De qualquer forma, para que o lodo de esgoto seja considerado matéria-prima, são necessárias pesquisas que comprovem que o mesmo não causa danos ao meio ambiente e à saúde humana.

Contudo, a distância e custo de transporte do lodo de esgoto entre a usina produtora e o local de aplicação podem comprometer a vantagem inicial do fertilizante.

Diante do exposto, este estudo tem como objetivo analisar o fluxo de energia no tratamento de esgoto e consequente produção de lodo de esgoto como biofertilizante potencial. Especificamente, buscou-se: a) avaliar o balanço e a eficiência energética do tratamento de esgoto, e do tratamento, carregamento e transporte do lodo de esgoto; b) avaliar a relação benefício custo do uso deste insumo para fins de fertilização do solo, comparando os custos de transporte com a economia gerada pela substituição do adubo químico.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 O tratamento de esgotos

4.1.1 Importância do tratamento de esgotos

Esgoto é o conjunto de todos os resíduos líquidos provenientes de indústrias, hospitais e domicílios que necessitam de tratamento adequado para que sejam removidas suas impurezas e assim possam ser devolvidos à natureza sem causar danos ambientais e à saúde humana (FARIA, 2009).

De forma geral, não existe um sistema de tratamento padrão a ser utilizado. Vários fatores influenciam na escolha das opções tecnológicas, tais como: disponibilidade de área, qualidade desejada para o efluente tratado, legislação referente ao local, entre outros (PIMENTA et al. 2002).

A própria natureza é capaz de decompor a matéria orgânica presente nos rios, lagos e mares. No entanto, essa matéria em grandes quantidades exige tratamento

mais eficaz em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) que, basicamente, reproduz a ação da natureza de maneira mais rápida (FARIA, 2009).

A necessidade de disposição e tratamento é reconhecida, mas, por falta de recursos, essas ações costumam ser postergadas, provocando problemas de saúde nas populações e degradação do meio ambiente (ZORATTO, 2006). De acordo com o mesmo autor, é por isso que muitas pessoas morrem vítimas de doenças hidrotansmissíveis decorrentes da falta de saneamento básico.

Além disso, a matéria orgânica presente nos esgotos pode causar a diminuição da concentração de oxigênio dissolvido provocando a morte de peixes e outros organismos aquáticos, escurecimento da água e exalação de odores desagradáveis. Há ainda a possibilidade de eutrofização¹ pela presença de nutrientes, provocando o crescimento acelerado de algas que conferem odor e gosto à água (A IMPORTÂNCIA, 2009).

4.1.2 Geração de lodo de esgoto

As Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), ao submeterem as águas servidas a processos que possibilitem seu retorno ao ambiente, geram resíduo denominado lodo de esgoto (LE) (QUINTANA, 2006). Como o estoque irregular desse material representa risco, recomenda-se a disposição de lodos em aterros sanitários.

Contudo, com o aumento da produção de lodo de esgoto e diante dos problemas ambientais que podem ser causados por seu acúmulo, torna-se cada vez mais urgente a necessidade de utilizá-lo de forma econômica e sem agressões ao meio ambiente (GONÇALVES, 2005).

Entre as opções disponíveis como a incineração, deposição oceânica e florestal, a utilização agrícola como fertilizante tem sido considerada promissora, uma vez que propõe uma maneira de transformar esse resíduo em um produto comercial (TAKAMATSU, 2004).

¹ Eutrofização: presença excessiva de nutrientes, sobretudo fosfatos e nitratos, em massas de água como mares e lagos, que origina desenvolvimento excessivo de matéria orgânica.

4.2 O lodo de esgoto

4.2.1 Características do lodo de esgoto

Os diferentes sistemas de tratamento e seus respectivos estágios produzem lodo de esgoto com características e quantidades variáveis (GONÇALVES, 2005).

Além disso, a composição do lodo é resultante dos hábitos culturais, saneamento, saúde e estágio de desenvolvimento industrial de uma região (PIGOZZO, 2003).

Devido à possível presença de metais pesados e organismos patogênicos em sua composição, oferece riscos à saúde do homem e do ambiente, com restrições para uso agrícola (MELO, 2002).

4.2.1.1 Agentes patogênicos

A concentração de agentes patogênicos no lodo de esgoto pode variar com o tempo e a origem do material. Embora contenha grande variedade de microorganismos, apenas pequena parte de bactérias, vírus, protozoários, helmintos e fungos, é que são nocivos aos homens e animais. Uma quantidade mínima destes patógenos pode infectar seus hospedeiros (TSUTIYA, 2001).

De acordo com os processos de tratamento do esgoto, o lodo de esgoto pode ser caracterizado nas classes A ou B, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Classificação do lodo de esgoto de acordo com a quantidade de agentes patogênicos.

Tipo de lodo de esgoto	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes <10 ³ NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo / g de ST Salmonella ausência em 10 g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF / g de ST
B	Coliformes Termotolerantes <10 ⁶ NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos / g de ST

ST: Sólidos Totais

NMP: Número Mais Provável

UFF: Unidade Formadora de Foco

UFP: Unidade Formadora de Placa

Fonte: Resolução N° 359 do CONAMA

Os processos de redução de atratividade de vetores² e redução de concentração de patógenos exigidos pela Resolução nº- 359 do CONAMA são baseados no estabelecido pela U.S.EPA, conforme 40 CFR Part 503 - Appendix B, Federal Register, de 19 de fevereiro de 1993. Assim, dentre os processos aceitos, necessários para a obtenção de lodos de esgoto tipo B, está a digestão anaeróbia por um período mínimo de 15 dias a 35-55°C ou de 60 dias a 20°C (CONAMA, 2006).

4.2.1.2 Metais pesados

O lodo de esgoto pode conter diferentes tipos e concentrações de metais pesados, que quando adicionados ao solo apresentam comportamento dependente do tipo deste solo. De acordo com a teoria do “platô”, a capacidade de adsorção³ de um metal é constante durante sua permanência no solo (MELO, 2002).

Outra teoria, conhecida por teoria da “bomba relógio”, considera que a capacidade de adsorção³ de um metal no solo tende a aumentar com a adição de lodo de esgotos, devido ao acréscimo de matéria orgânica. Assim, os metais disponíveis no solo aumentariam, colocando em risco o ambiente e a possibilidade de penetrar na cadeia alimentar. Porém, esses incrementos na capacidade de adsorção³ diminuiriam aos níveis iniciais devido à decomposição de matéria orgânica e interrupção do depósito de lodo de esgotos (MARQUES et al., 2001).

O balanço entre a adição e a extração dos metais pesados nos solos indica que as concentrações desses elementos tendem a aumentar de acordo com as atividades industriais e agrícolas, sendo a completa remoção desses contaminantes praticamente impossível (MELO, 2002).

A fitodisponibilidade desses metais sofre interferência de atributos do solo, natureza do elemento, presença de outros elementos, características dos resíduos depositados, atividade biológica e fatores ambientais (MARQUES et al., 2001).

Quanto aos atributos do solo, especificamente, a solubilidade dos metais pesados está sujeita a fatores tais como pH, textura, matéria orgânica, capacidade de

² Vetores: roedores, insetos ou outros transmissores de agentes patogênicos.

³ Adsorção: fixação das moléculas de uma substância na superfície de outra.

troca catiônica, e outros fatores intrínsecos ao solo (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 1992).

Em geral, esses elementos formam complexos com a matéria orgânica, diminuindo sua mobilidade no solo. No entanto, com a formação de complexos de baixo peso molecular pode ocorrer movimentação em profundidade (MELO, 2002).

Solos leves disponibilizam os metais pesados facilmente por um curto período. Por sua vez, o solo argiloso possui boa capacidade de armazenamento desses metais, de forma a fornecê-los lentamente às plantas (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 1992).

Quanto mais argiloso o solo, maior tende a ser sua CTC, e maior a possibilidade de ter o metal pesado na sua forma trocável (MELO, 1997).

Quanto ao pH, os metais pesados têm sua solubilidade diminuída com o aumento deste fator (com exceção do molibdênio e do selênio) (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 1992).

De qualquer forma, os lotes de lodo de esgoto para o uso agrícola devem respeitar os limites máximos de concentração de metais pesados da Tabela 2, a seguir:

Tabela 2. Concentração máxima permitida de substâncias inorgânicas no lodo de esgoto.

Substâncias Inorgânicas	Valores (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromo	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Fonte: Resolução N° 359 do CONAMA.

4.2.2 Uso agrícola

4.2.2.1 Legislação

O uso agrícola do lodo de esgoto segue a Resolução N° 359 do CONAMA, de 29 de agosto de 2006 que, entre outras providências, define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. De acordo com essa resolução tem-se que:

Lodos de esgoto classe A poderão ser utilizados em quaisquer culturas.

A utilização de lodo de esgoto classe B é restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, seguida de incorporação.

No entanto, para ambas situações, devem ser respeitadas as restrições a seguir.

Em solos onde for aplicado lodo de esgoto, as pastagens poderão ser implantadas somente após um período mínimo de 24 meses da última aplicação. Olerícolas, tubérculos, raízes e demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo, além de cultivos inundáveis, somente após período mínimo de 48 meses da última aplicação.

Além disso, não é permitida a aplicação de lodo de esgoto em:

- unidades de conservação, com exceção das Áreas de Proteção Ambiental- APA;
- Área de Preservação Permanente - APP;
- Áreas de Proteção aos Mananciais - APMs definidas por legislações estaduais e municipais e outras áreas de captação de água para abastecimento público;
- interior da Zona de Transporte para fontes de águas minerais, balneários e estâncias de águas minerais e potáveis de mesa;
- raio mínimo de 100 m de poços rasos e residências, podendo este limite ser ampliado para garantir que não ocorram incômodos à vizinhança;

- numa distância mínima de 15 (quinze) metros de vias de domínio público e drenos interceptadores e divisores de águas superficiais de jusante e de trincheiras drenantes de águas subterrâneas e superficiais;
 - área agrícola cuja declividade das parcelas ultrapasse:
 - a) 10% no caso de aplicação superficial sem incorporação;
 - b) 15% no caso de aplicação superficial com incorporação;
 - c) 18% no caso de aplicação subsuperficial e em sulcos, e no caso de aplicação superficial sem incorporação em áreas para produção florestal;
 - d) 25% no caso de aplicação em covas;
 - parcelas com solos com menos de 50 cm de espessura até o horizonte C;
 - áreas onde a profundidade do nível do aquífero freático seja inferior a 1,5 m na cota mais baixa do terreno; e
 - áreas agrícolas definidas como não adequadas por decisão motivada dos órgãos ambientais e de agricultura competentes.

A aplicação máxima anual de lodo de esgoto em toneladas por hectare não deverá exceder o quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura (em kg/ha), segundo a recomendação agrônômica oficial do Estado de São Paulo, e o teor de nitrogênio disponível no lodo de esgoto (N_{disp} em kg/t):

$$\text{Taxa de aplicação (t/ha)} = \frac{\text{N recomendado (kg/ha)}}{\text{N}_{\text{disp}} \text{ (kg/t)}} \quad \text{Eq. 1}$$

O cálculo da taxa de aplicação máxima anual deverá levar em conta os resultados dos ensaios de elevação de pH provocado pelo lodo de esgoto no solo predominante na região de modo a garantir que o pH final da mistura solo-lodo de esgoto não ultrapasse o limite de 7,0;

A observância dos limites de carga total acumulada teórica no solo quanto à aplicação de substâncias inorgânicas, considerando a Tabela 3, a seguir:

Tabela 3. Cargas acumuladas permitidas de substâncias inorgânicas pela aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas.

Substâncias inorgânicas	Valores (kg/ha)
Arsênio	30
Bário	265
Cádmio	4
Chumbo	41
Cobre	137
Cromio	154
Mercúrio	1,2
Molibdênio	13
Níquel	74
Selênio	13
Zinco	445

Fonte: Resolução Nº 359 do CONAMA.

Para o manuseio e a aplicação do lodo de esgoto, a Unidade Geradora de Lodo (UGL) deverá informar ao proprietário, arrendatário, operadores e transportadores as seguintes exigências:

- restrições de uso da área e do lodo de esgoto;
- limites da área de aplicação de lodo de esgoto estabelecidos no projeto agrônômico;
- técnicas e práticas adequadas de conservação de solo e água;
- não aplicar lodo de esgoto em condições de chuvas;
- evitar a aplicação manual de lodo de esgoto classe A;
- para o lodo de esgoto classe B fazer obrigatoriamente a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas, com incorporação do lodo logo após a aplicação;
- orientar os operadores quanto aos procedimentos de higiene e segurança e ao uso de equipamentos de proteção individual conforme legislação trabalhista;
- usar equipamento adequado e regulado de forma a garantir a taxa de aplicação prevista no projeto;
- evitar a realização de cultivo ou outro trabalho manual na área que recebeu o lodo de esgoto por um período de 30 dias após a aplicação;
- em caso de colheita manual, a aplicação de lodo de esgoto classe B deverá ser feita no mínimo 6 meses antes da colheita;

- para o lodo de esgoto classe B, tomar medidas adequadas para restringir o acesso do público às áreas de aplicação de lodo de esgoto, durante um período de 12 meses após a última aplicação. Estas medidas devem, necessariamente, incluir a colocação de sinalização indicando as atividades que estão sendo realizadas em cada local; e
- o proprietário ou arrendatário deve notificar quaisquer situações de desconformidade com a execução do projeto agrônômico à UGL que deverá informar imediatamente aos órgãos competentes.

Embora atualmente seja permitida a aplicação de lodo de esgoto classes A e B na agricultura, vale ressaltar que a partir de junho de 2011, a Resolução N° 359 do CONAMA permitirá somente a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado classe A, exceto sejam propostos novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais, que demonstrem a segurança do uso do lodo de esgoto Classe B.

4.2.2.2 Influências do lodo de esgoto nas propriedades do solo

A aplicação de lodo de esgoto nos solos pode contribuir para o aumento da concentração de nutrientes essenciais, como N e P, e para o melhoramento dos atributos físicos de solos altamente intemperizados (LAMBAIS & CARMO, 2008).

Como a degradação das condições físicas do solo e o aumento do risco de erosão estão fortemente relacionados com os cultivos intensivos devido ao decréscimo gradual da matéria orgânica contida no solo, o LE pode ser alternativa para contenção dessa degradação, pois serve também como condicionador do solo devido às propriedades benéficas químicas e físicas. Nestas propriedades destacam-se altos teores de matéria orgânica, incluindo húmus, além da capacidade de aumentar a estabilidade de agregação do solo (GONÇALVES, 2005).

Segundo Malta (2001), o lodo de esgoto altera as propriedades físicas do solo, melhorando sua densidade, porosidade e capacidade de retenção de água. Além disso, melhora seu nível de fertilidade, elevando o pH, diminuindo o teor de alumínio trocável, aumentando a capacidade de troca de cátions (CTC) e a capacidade de fornecer nutrientes para as plantas; e ainda, por conter em sua constituição teores elevados de matéria orgânica e de

outros nutrientes, promove o crescimento de organismos do solo, fundamentais para a ciclagem dos elementos.

4.2.2.3 Produtividade do lodo de esgoto como biofertilizante

O lodo de esgoto pode ser considerado excelente biofertilizante devido à quantidade de matéria orgânica e macro e micronutrientes nele contidos (MELO et al., 2001). De fato, muitos autores ressaltam o benefício da aplicação do lodo no desenvolvimento da vegetação, além da recuperação de solos (BEZERRA et al., 2006).

Ao avaliar a eficiência do lodo de esgoto como fonte de fósforo em comparação ao superfosfato triplo, aplicados em doses equivalentes, Silva et al. (2002) notaram que aquele foi mais eficiente do que este.

Galdos et al. (2004) realizaram experimento com duração de dois anos agrícolas, para determinar as alterações que a aplicação de lodo de esgoto gerou sobre os teores de fósforo, entre outros elementos, num Latossolo Vermelho eutroférico cultivado com milho. Observaram que a produção foi maior nos tratamentos com este tipo de fertilização, onde os teores de fósforo no solo foram semelhantes aos do tratamento com adubo químico.

Este biofertilizante, além de fósforo, oferece também nitrogênio e outros nutrientes para as plantas, contribuindo com o seu desenvolvimento (SABBEY, 1974).

Nascimento et al. (2004), ao estudarem o efeito da aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto gerado pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) sobre o crescimento das plantas de milho e feijão cultivadas em casa de vegetação, concluíram que doses crescentes aumentaram a produção de matéria seca em ambas.

Rocha et al. (2004) avaliaram o estado nutricional e o crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com lodo de esgoto. Na ocasião, notaram que a aplicação deste resíduo influenciou positivamente na nutrição das plantas, proporcionando produção de madeira igual à obtida no tratamento que só recebeu adubação mineral, quando a dose aplicada de lodo de esgoto foi de 12t ha⁻¹.

Trannin (2004), observou que o lodo de esgoto melhorou a fertilidade do solo, o estado nutricional e a produtividade do milho.

No entanto, é preciso cuidado porque o uso exclusivo de lodo de esgoto como fertilizante poderá causar deficiências nutricionais para as culturas devido ao desequilíbrio no teor de nutrientes oferecidos (SOUZA, 2004).

4.2.2.4 Avaliação econômica do lodo de esgoto como biofertilizante

A fertilização é considerada um dos processos mais caros da produção na agricultura.

De acordo com Alves Filho et. al (2003), na implantação e condução de pastagens cultivadas de inverno, os fertilizantes representaram o maior custo.

Uma possível solução para este fato seria a disposição agrícola do lodo de esgoto, prática vantajosa aos agricultores na medida em que reduz os custos de produção e mantém a produtividade da lavoura (TRANNIN et al., 2005).

Guedes et al. (2006), afirmam que a utilização de lodo de esgoto como fertilizante permite ganhos ao produtor, pelos mesmos motivos, ou seja, aumento da produtividade das culturas e redução do uso de fertilizantes minerais.

De fato, Quintana et al. (2009) ao estudarem a aplicação de lodo de esgoto em lavoura de milho, concluíram que a adubação com este, proporcionou maior rentabilidade quando comparada à fertilização com adubo industrial. Isso ocorreu porque as aplicações de lodo de esgoto permitiram aumentos na produtividade do milho e diminuição dos custos com fertilizantes industriais.

Dessa forma, o uso de áreas agrícolas para disposição do LE caracteriza uma boa alternativa, não só no aspecto ambiental, mas também na diminuição de custos e garantia de reciclagem de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, que se tornarão cada vez mais escassos no futuro (GONÇALVES. 2005).

4.2.2.5 Análise energética do lodo de esgoto como biofertilizante

Os sistemas de produção agrícola precisam ser energeticamente sustentáveis, uma vez que são sistemas abertos e a quantidade de energia que entra no sistema deve ser preferencialmente, igual ou menor à que sai (MACHADO FILHO et al. 2001).

Segundo os autores, uma das maneiras de aumentar a eficiência energética seria reduzir a entrada de energia fóssil, especialmente àquela relacionada à aplicação de fertilizantes.

A energia direta utilizada em um processo produtivo não inclui somente o combustível fóssil consumido, mas também outras formas de energia derivadas do petróleo, tais como as contidas nos lubrificantes, nos adubos e nos defensivos agrícolas (CAMPOS, 2001).

Um fator de estrangulamento muito forte no consumo energético geral tem sido a utilização massiva de fertilizantes derivados do petróleo nos agroecossistemas (CAMPOS & CAMPOS, 2004).

De fato, Seixas & Marchetti (1982) estimaram que a agricultura brasileira utiliza 58% de sua energia na forma de fertilizantes.

Da mesma forma, Siqueira et al. (1999), concluíram que, para a implantação e manejo da aveia e do nabo, o maior consumo de energia foi com combustível e fertilizantes.

Em balanços de energia determinados por Tsatsarelis (1993) para o cultivo de trigo na Grécia, o autor concluiu que grande parte da energia total inserida foi representada pelos fertilizantes industriais, incluindo aplicação.

Assim, o lodo de esgoto, potencial complemento dos fertilizantes químicos, pode também contribuir com a redução de uso do petróleo (QUINTANA et al., 2008).

4.3. O transporte do lodo de esgoto

4.3.1 Legislação

O transporte, além do carregamento e da estocagem de lodo de esgoto, é de responsabilidade da UGL (Unidade Geradora de Lodo). Esses procedimentos são regulamentados pelo Artigo 19 da Seção VIII da Resolução nº- 359 do CONAMA, que diz:

1. O lodo de esgoto ou produto derivado somente será carregado e retirado da ETE ou UGL mediante a apresentação pelo motorista do caminhão, do Termo de Responsabilidade e do Formulário de Controle de Retirada.

2. O motorista deve estar devidamente cadastrado e credenciado na empresa geradora do lodo de esgoto ou produto derivado.

3. Para o transporte deverão ser utilizados caminhões com carrocerias totalmente vedadas, tais como os caminhões basculantes, equipados com sistema de trava para impedir a abertura da tampa traseira, lona plástica para cobertura, cone de sinalização, pá ou enxada e um par de luvas de látex.

4. É proibido qualquer tipo de coroamento nos caminhões (altura da carga ultrapassando a altura da carroceria).

5. Os caminhões devem possuir algum tipo de sistema de comunicação para uso imediato em caso de ocorrência de sinistro.

6. Em caso de sinistro em vias públicas, com derramamento de lodo de esgoto, todos os procedimentos para limpeza são de responsabilidade da empresa transportadora do lodo de esgoto ou produto derivado.

7. Todos trabalhadores em contato com o lodo de esgoto ou produto derivado deverão sempre utilizar luvas de proteção plásticas ou de couro. Também é requerido o uso de calçado adequado, sapatos ou botas de couro ou plástico, sendo proibido o uso de sandálias e outros calçados abertos.

8. Ao término dos serviços lavar com água e sabão as luvas, os calçados e as mãos.

9. Deverá ser observada a limpeza dos pneus na saída dos caminhões da ETE ou UGL.

4.3.2 Custo

Vários fatores influenciam o transporte de cargas pelo modal rodoviário: tipos de veículo, a distância de transporte, o valor unitário do frete, as condições em que se encontram a malha rodoviária, o tempo de espera no carregamento e descarregamento, a capacidade de carga em volume que o veículo transporta, as condições locais e regionais e os tipos de equipamentos de carregamento e descarregamento (MACHADO, 2000).

O custo com transporte e distribuição do lodo de esgoto no solo é o fator mais limitante para viabilizar economicamente a reciclagem agrícola deste resíduo (ANDREOLI et al., 1999; BETTIOL & CAMARGO, 2000), principalmente quando se pensa na aplicação em áreas distantes das ETEs geradoras, devido ao alto teor de umidade, o que significa pagamento para transporte de água (MELO et al., 2001).

Dessa forma, a vantagem inicial do lodo de esgoto como fertilizante é limitada pela distância de transporte do material entre a ETE fornecedora e o local de aplicação do material (SILVA et al., 2002).

Os mesmos autores defendem que a distância máxima de transporte do lodo deve ser igual a sua capacidade fertilizadora, o que compensaria o valor do frete; e esclarecem que para aumentar a área de abrangência de distribuição do material existe a possibilidade de remoção do excesso de água, visto que para o mesmo volume de carga transportam-se mais nutrientes. Assim, concluíram que o material com 90% de umidade pode ser transportado até 122 km, chegando a 1105 km de distância para o lodo de esgoto com 10% de teor de água

Por fim, Trannin et al. (2005) alertam que na gestão adequada dos resíduos, para manter o lodo de esgoto em aterros sanitários, uma ETE desembolsa cerca de R\$100,00 por tonelada do produto, custo bastante elevado quando comparado ao valor do frete na época ($\text{R}\$0,15 \text{ t}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$), sugerindo que este poderia ser subsidiado pela ETE geradora.

4.4. Análise energética

4.4.1 Crise energética

A disponibilidade de energia a baixo custo permitiu difundir o emprego de novas técnicas tais como maquinarias, fertilizantes e pesticidas, que possibilitaram o alcance de altos níveis de rendimentos. No entanto, todo aumento de produtividade, veio acompanhado de um aumento no consumo de energia direta e indireta (COSTANTINI, 1982).

Com o crescente consumo de energia em todos os setores, tornou-se notória a extrema dependência da sociedade moderna em relação ao petróleo como fonte principal de energia (MORATELLI & BAIIO, 2006).

Em 1973, a escassez de combustíveis levou os países do oriente médio a sextuplicar o preço do petróleo. O fato teve grande repercussão na agricultura, potencial produtora e fornecedora de energia, também dependente desses insumos (FERREIRA & ULBANERE, 1989).

O maior problema decorrente da crise energética é a necessidade de aumento na produtividade conciliada com redução no consumo de combustíveis fósseis e seus derivados (COSTANTINI, 1982).

Além disso, a pressão mundial pelo aumento da produção de energias renováveis veio associada à atual conscientização mundial pela diminuição dos fatores geradores do efeito estufa (MORATELLI & BAIIO, 2006).

Dessa forma, a agricultura precisa atingir uma mudança tecnológica que permita o aumento adequado da produtividade para que não haja nenhum ponto de estrangulamento no crescimento econômico (KROM & PACCOLA, 1995).

A energia de origem fóssil desempenha papel vital nos sistemas de produção agrícola, pois seu preço afeta todos os custos da cadeia produtiva (FLUCK, 1979).

Ulbanere (1988) relata que com a crise energética, além do balanço contábil, o balanço energético também passou a ter importância.

Panesar & Fluck (1993) afirmam que a energia é um dos principais fatores de produção agrícola. De fato, a agricultura tem-se caracterizado pelo elevado

consumo de derivados do petróleo e de recursos não-renováveis. Nesse contexto, a produção primária vem se tornando cada vez mais vulnerável e dependente das indústrias produtoras de insumos e processadoras da produção (CAMPOS, 2001).

Cleveland (1995) afirma que com os aumentos de preços, os produtores rurais buscam mudanças técnicas e administrativas que promovam o aumento da eficiência energética.

Um ponto importante para o planejamento e implantação de um sistema de produção de energia a partir de biomassa é o princípio de que este deve ter um balanço energético positivo, ou seja, para cada unidade de kcal utilizada na produção de bioenergia deve produzir, no mínimo, a mesma unidade de kcal por este sistema de produção (MORATELLI & BAIO, 2006).

Assim, a utilização de balanços de energia pode constituir-se importante instrumental para a definição de novas técnicas e manejos, que podem vir a proporcionar importantes economias de energia e, conseqüentemente, aumento de eficiência e redução de custo de produção (CAMPOS, 2001).

4.4.2 Classificação da energia

De acordo com Malassis (1973) a produção agrícola possui três fluxos de energia: interno, energia contida na própria produção; externo, energia injetada no agroecossistema; e por fim, fluxo perdido ou reciclado, que consiste nas energias não aproveitáveis na produção, que podem ser recicladas ou não.

A FAO (1976) classifica os recursos energéticos em renováveis: produtos resultantes da atividade fotossintética; e não-renováveis: caracterizados pelos combustíveis fósseis.

Para Junqueira et al. (1982), a energia consumida na agricultura é classificada em: a) energia não utilizada diretamente no processo produtivo: energia gasta pelo trabalhador rural para seu bem-estar e nos trabalhos pós-colheita; b) energia utilizada diretamente no processo produtivo, mas não convertida em energia do produto final: é utilizada em operações agrícolas que tornam a produção possível ou mais eficiente, mas, que

não fazem parte do produto final; e c) energia convertida em produto final: energia gasta na manutenção e no crescimento de animais e plantas ou que será armazenada na forma de alimento ou de material combustível.

Carmo et al. (1988) classificaram a energia de acordo com sua origem, nas categorias Biológica (energia humana, animal, resíduos de animais e da agroindústria, sementes, mudas, alimentos para animais, adubação verde e cobertura morta), Fóssil (produtos e subprodutos do petróleo, incluindo, adubos químicos e agrotóxicos); e “Industrial” (máquinas e equipamentos agrícolas à tração mecânica e animal e a energia elétrica).

Comitre (1993) propôs divisão semelhante, tendo duas grandes matrizes de energia: Direta e Indireta. Na energia Direta consideraram-se as subdivisões: biológica, elétrica e fóssil. A Energia Indireta enquadra a energia industrial, composta por máquinas, calcário, adubo formulado, inseticida e herbicida.

A forma de classificação da energia mais utilizada nos trabalhos tem sido a divisão em energia direta e energia indireta (CAMPOS, 2001).

4.4.3 Energia e sustentabilidade

A análise energética complementa, juntamente com outras abordagens, estudos mais aprofundados sobre os agroecossistemas, principalmente no tocante à sustentabilidade (BUENO, 2002).

Seu objetivo principal é traduzir em equivalentes energéticos, os fatores de produção e os consumos intermediários, possibilitando assim, a construção de indicadores que permitam intervenção no sistema produtivo para a melhoria de sua eficiência (BUENO et al., 2000).

Ao contrário do que se pensa, é preciso investir muita energia antes de se obter novas quantidades apreciáveis dela (CAMPOS, 2001).

Giampietro et al. (1992) consideram que as análises energéticas parecem ser uma promissora abordagem metodológica para avaliar e investigar os problemas relacionados a sustentabilidade e eficiência de sistemas agrícolas.

Ao estudar a eficiência energética visando à sustentabilidade da agricultura dinamarquesa por exemplo, Schroll (1994), observou que aquela decrescia à medida que problemas ambientais apareciam.

4.4.4 Energia e lodo de esgoto

A literatura revela, em todos os campos de especialização de agricultura, uma série de esforços no sentido de poupar energia em certas operações e evitar excessos de insumos (CAMPOS, 2001).

Mello (1986) verificou que a tração motorizada e os insumos químicos para fertilização e defesa da produção representam os maiores custos energéticos agrícolas no estado de Santa Catarina.

Segundo Schroll (1994), uma das maneiras de aumentar a eficiência energética de um agroecossistema, seria reduzir a entrada de energia fóssil, especialmente àquela relacionada à aplicação de fertilizantes.

De fato, o Nitrogênio é o nutriente que mais consome energia durante o processo de fabricação (SILVA & GRAZIANO, 1977).

Para Mello (1986), a quantificação de modelos qualitativos permite a identificação de desperdícios de energia, de componentes que podem ser substituídos por outros de maior eficiência energética ou simplesmente eliminados, ou seja, de interferir na estrutura do sistema para torná-lo mais eficiente energeticamente.

Boyeldieu (1975) adverte que a valorização de resíduos, principalmente os orgânicos, deve ser considerada em razão do melhor aproveitamento de adubos e corretivos.

O emprego de lodo de esgoto como fertilizante reduziria 60% do consumo de fertilizantes fosfatados atualmente utilizados (FRANK, 1998).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de estudo

Em funcionamento desde março de 1998, a estação de tratamento de esgotos de Franca ocupa uma área de 20 hectares localizada junto à margem esquerda do córrego dos Bagres, próximo à Rodovia Cândido Portinari, no município de Franca. Opera com 70% de sua capacidade, e atende aproximadamente 80% da população dessa cidade. Os esgotos afluentes à ETE de Franca são predominantemente domésticos, sendo desprezível a contribuição industrial (VANZO et. al, 2000).

De acordo com os mesmos autores, em outubro de 1999, a estação recebeu o registro de estabelecimento produtor de insumo agrícola pelo Ministério da Agricultura e do Abastecimento, devido ao lodo de esgoto produzido, classificado pelo Ministério da Agricultura como condicionador de solo, com a denominação comercial de Sabesfértil, registrado sob o número SP-09599 00001-0.

No entanto, com a Resolução nº- 359 do CONAMA, de 29 de agosto de 2006, o lodo gerado nessa Estação, o Sabesfértil, deixou de ser considerado insumo agrícola.

5.2 O processo de tratamento de esgotos na ETE de Franca

A ETE de Franca adota o tratamento de lodos ativados convencional. Sendo assim, essa estação é composta pelas seguintes unidades:

Fase líquida (tratamento de esgoto)

- Setor 1: Elevatória de esgoto bruto.

O esgoto chega à estação. Em seguida, é realizada a remoção de materiais sólidos, onde são necessárias três grades: uma grossa e manual e duas finas e mecanizadas. Após o gradeamento, o esgoto passa pelas caixas de areia aeradas onde é removida a areia. Por fim, o efluente é enviado ao poço de sucção da estação elevatória de esgoto bruto, de onde será bombeado aos decantadores primários no setor 2.

- Setor 2: Decantadores primários.

Nessa fase ocorre a remoção dos sólidos sedimentáveis, encaminhados para o tratamento de lodo no setor 5. O lodo primário descartado através de válvulas motorizadas vai para os tanques de aeração do setor 3 para tratamento biológico.

- Setor 3: Tanques de aeração.

Aqui, o efluente é misturado ao lodo ativado que é bombeado dos decantadores secundários. O lodo ativado permanece nesse setor por cerca de quatro dias quando é descartado e enviado para digestão no setor 6.

- Setor 4: Decantadores secundários/ Elevatória de retorno de lodo.

Os decantadores secundários são dimensionados para separar o lodo decantado, que é bombeado para retorno aos tanques de aeração do setor 3.

Fase sólida (tratamento do lodo)

- Setor 5: Adensadores de lodo.

O lodo descartado nos tanques de aeração é encaminhado aos adensadores onde ocorre o aumento da concentração de matéria sólida, enviada aos biodigestores. O lodo primário gerado no setor 2 passa por uma grade fina para remoção de materiais e em seguida é bombeado para os biodigestores.

- Setor 6: Biodigestores.

Aqui é processada a digestão anaeróbia do lodo. Nessa fase acontece a transformação da matéria orgânica em gases. O gás produzido no topo dos biodigestores e os gases poluentes são eliminados em processo de queima. O lodo digerido é enviado aos filtros-prensa para desaguamento.

- Setor 7: Filtros-prensa de esteira.

A remoção de umidade do lodo é feita por filtros-prensa de esteira, atingindo sólidos secos em 25%.

- Setor 8: Elevatória de esgoto tratado.

Finalmente, o esgoto tratado é bombeado para retorno ao ambiente.

Na figura a seguir tem-se uma vista geral da estação.

ETE Franca

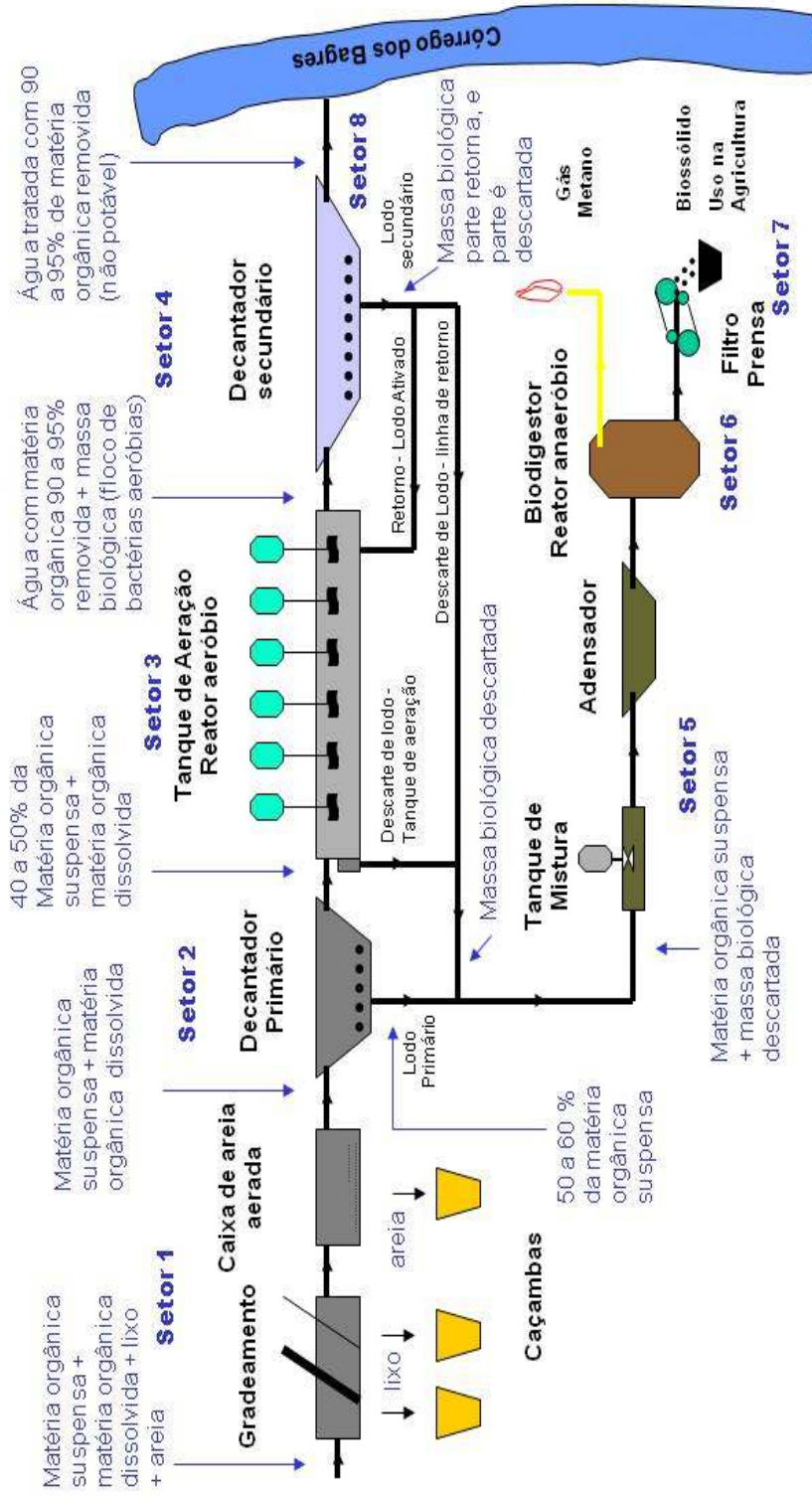


Figura 1. O processo de tratamento de esgotos na ETE de Franca.

Fonte: Estação de Tratamento de Esgotos de Franca (2009).

Tabela 4. Dados dos equipamentos utilizados no tratamento de esgotos de Franca (Cia. de Saneamento Básico do Estado de São Paulo/SABESP).

Setor	Máquinas	Quant.	Potência (cv)	Consumo (g)* ou (l)***	Vida útil (anos)	Peso (t)
1	Motobombas centrífugas	3	220	100	25	1,4
	Sopradores de ar	2	60	40	25	0,7
	Motorreduzidos	2	2	40	25	1,1
2	Raspadores	3	1	100	25	0,8
3	Aeradores	12	75	50	25	2,0
4	Motobombas centrífugas	3	125	100	25	1,2
5	Raspadores	2	1	40	25	0,8
6	Recicurladores	3	1	100	40	0,6
	Motob. de alimentação	2	20	1***	25	0,6
	Motob. de homogeneização	3	5	1***	25	0,4
7	Filtros-prensa	2	25	1200**	25	1,8
	Bombas de alimentação	2	15	---	25	0,2
	Batedores de polímeros	2	5	2***	25	0,08
	Correia transportadora	1	15	80	25	1,0
	Bombas de polímero	2	1	---	25	0,06
	Motobombas de lavagem	2	15	---	25	0,08
8	Motobombas centrífugas	3	125	100	25	1,2
	Motobombas de retorno	2	75	40	25	0,7
	Motob. de água de reuso	3	15	2***	25	0,08

*Consumo a cada 42 dias.

** Consumo a cada 15 dias.

*** Consumo de litro por ano.

Fonte: SABESP/Franca.

5.3 Caracterização do lodo de esgoto

5.3.1 Parâmetros agronômicos

O lodo de esgoto produzido pela ETE de Franca é rico em matéria orgânica. Os micronutrientes nele encontrados são: cobre, ferro, boro e zinco (VANZO et. al, 2000). Além disso, uma tonelada deste material fornece 79,1kg de N, 10,6 kg de P₂O₅ e 0,63 kg de K₂O (base seca) e contém ainda outros macronutrientes, tais como cálcio, magnésio e enxofre (RELATÓRIO CONVÊNIO, 2001).

Com as quantidades em massa de N, P₂O₅ e K₂O fornecidas pelo lodo, calculou-se, a porcentagem, a energia e o preço desses fertilizantes contidos em uma tonelada do material.

Além disso, estimou-se a energia e o valor monetário dos fertilizantes presentes no lodo e conseqüentemente economizados com a aplicação do biofertilizante nas lavouras de café, muito comuns naquela região.

Por fim, compararam-se os custos de transporte com a economia gerada pela substituição do adubo químico pelo biofertilizante.

5.3.2 Metais pesados

A ETE de Franca recebe predominantemente esgotos domésticos, pois o esgoto industrial da cidade é tratado em outras estações. Sendo assim, o lodo de esgoto produzido possui concentração de substâncias inorgânicas dentro da máxima permitida pela Resolução nº- 359 do CONAMA.

5.4 Coeficientes energéticos

Os estudos em eficiência energética utilizam a unidade do Sistema Internacional (SI), o Joule (J), para medição de energia. Adotou-se 0,24 como índice de conversão de Joule (J) em caloria (cal) e 4,1855 como índice de conversão de caloria em Joule. A apresentação final dos dados foi aproximada em duas casas decimais.

Todas as operações estudadas foram detalhadas quanto às suas unidades energéticas: jornada de trabalho, coeficientes de tempo de operação por unidade de área ou rendimento, identificação das máquinas, implementos e equipamentos; suas especificações e respectivos consumos de combustíveis, lubrificantes e graxas.

5.4.1 Lodo de esgoto

De acordo com Quintana et al. (2008), o valor médio calculado do poder calorífico do lodo de esgoto da ETE de Barueri é de 21,25 MJ.kg⁻¹. Vale ressaltar que a

composição do lodo de esgoto pode variar diariamente e de acordo com a Estação de Tratamento de Esgoto em que foi produzido.

5.4.2 Fertilizantes químicos

De acordo com Leach (1976) parte dos fertilizantes industriais utilizados são importados. Dessa forma, o autor propõe adicionar aos seus equivalentes energéticos $0,50 \text{ MJ.kg}^{-1}$, correspondente ao transporte marítimo.

O coeficiente calórico para N, segundo Felipe Jr. (1984), é de $62,49 \text{ MJ.kg}^{-1}$; para P_2O_5 os valores estimados por Lockeretz (1980) são $9,63 \text{ MJ.kg}^{-1}$ e para K_2O , segundo Pellizzi (1992), $9,17 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Sendo assim, Almeida (2007) estimou a porcentagem média de importação de fertilizantes no Brasil e combinou esses dados com os coeficientes energéticos dos elementos da mistura e os gastos energéticos de transporte.

Portanto os valores calóricos dos fertilizantes, recalculados pelo autor são $62,84 \text{ MJ.kg}^{-1}$ para N; $9,89 \text{ MJ.kg}^{-1}$ para P_2O_5 e $9,62 \text{ MJ.kg}^{-1}$ para K_2O . Com esses valores, calculou-se a energia dos fertilizantes contida no lodo de esgoto transportado com a capacidade de carga do caminhão avaliado neste estudo.

5.4.3 Mão de obra

Existem inúmeros métodos para o cálculo e a avaliação da energia contida no trabalho humano (BUENO, 2002). De acordo com Campos (2001) isso acontece porque os estudiosos na área têm idéias e argumentos diferentes.

Fluck (1981) afirma que a energia proveniente da mão de obra é incluída nos cálculos devido ao valor intrínseco ao trabalho muscular, além do conteúdo energético do alimento consumido pelo trabalhador. Além disso, a mão-de-obra é substituível por outras fontes de entrada no sistema produtivo.

Entretanto, alguns autores não consideram a mão de obra em seus estudos de balanços energéticos alegando que o homem, seja trabalhando ou desempregado, consome praticamente a mesma quantidade de alimento, moradia e vestuário.

Neste trabalho, adotou-se o mesmo valor usado por Bansal et al. (1988), trabalhando em regiões semi-áridas: $0,22 \text{ MJ.h}^{-1}$ para homens adultos.

5.4.4 Máquinas e equipamentos

À semelhança da depreciação econômica, o cálculo da depreciação energética de máquinas e equipamentos é baseado em sua vida útil, porém, tendo como parâmetro, seus pesos. Dessa forma, resta ao final somente a energia embutida na matéria prima de fabricação (ALMEIDA, 2007).

De acordo com o mesmo autor, é justamente por isso que a energia contida na matéria prima não é considerada no cálculo da energia direta, mas atribuída ao valor adicionado na fabricação.

Assim, a depreciação energética (DE) de máquinas e equipamentos foi obtida através da equação proposta por Beber (1989):

$$DE = \{(0,9 \times M) \times VU\} \times (TU)^{-1} \quad \text{Eq. 2}$$

onde:

DE = depreciação energética em Mega Joules (MJ)

M = massa da máquina em quilos (kg)

VU = vida útil da máquina em horas (h)

TU = tempo de uso da máquina em horas (h)

Para o trator e a retroescavadeira, que possuem o mesmo tempo de vida útil (60.000 horas), a massa final foi calculada pelo peso de embarque, que é o peso do trator, sem contrapesos, sem água nos pneus, sem operador e tanque de combustível com somente 20 litros de óleo Diesel (BUENO, 2002). Portanto, os respectivos valores para o caminhão e a retroescavadeira, são de 3.700 kg e 5.650 kg de peso de embarque.

Ressalta-se que como se estudou o ciclo diário de tratamento de esgoto e conseqüente produção de lodo, foram consideradas 24 horas de uso dos equipamentos, já que a Estação não cessa os trabalhos. Contudo, como o carregamento e o transporte não são contínuos, dentro de um dia, levam respectivamente 1,5 e 3 horas de uso.

5.4.5 Combustíveis, lubrificantes e óleos

De acordo com BEN (BRASIL, 2007) o poder calorífico do óleo Diesel é $10.100 \text{ kcal.kg}^{-1}$. Sendo sua densidade específica $0,84 \text{ kg.l}^{-1}$, conclui-se que o poder calorífico, para fins de cálculo, do óleo Diesel é $8.484 \text{ kcal.l}^{-1}$ ou $35,51 \text{ MJ.l}^{-1}$.

Para os óleos lubrificantes que possuem o poder calorífico de $10.120 \text{ kcal.kg}^{-1}$ com densidade específica de $0,88 \text{ kg.l}^{-1}$ (BRASIL, 2007), tem-se $8.905,60 \text{ kcal.l}^{-1}$, ou $37,27 \text{ MJ.l}^{-1}$.

A graxa, classificada no BEN como outras fontes não-energéticas de petróleo, tem o poder calorífico de $10.200 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e densidade específica de $0,87 \text{ kg.l}^{-1}$, sendo seu poder calorífico inferior de $8.874 \text{ kcal.l}^{-1}$ ou $37,14 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

5.5 Cálculo do custo de transporte

Usando a mesma metodologia aplicada por Silva et. al (2007), para o cálculo do custo de transporte adaptou-se a seguinte fórmula:

$$CT = (Pf \times Cap^{-1}) \times 2D \times P \quad \text{Eq. 3}$$

em que:

CT = custo de transporte (US\$);

Pf = fator indicativo do preço médio do frete no mercado por km (US\$/km);

Cap = capacidade de carga (transporte) do caminhão (m^3); para este estudo, a capacidade de carga do caminhão foi medida em tonelada (t);

2 = distância multiplicada por 2, pois considera a viagem de ida e volta;

D = distância (km).

P = produção (t)

Optou-se pelo uso desta fórmula (3) uma vez que a Estação de Tratamento de Esgotos terceiriza o transporte. Na adaptação, desconsiderou-se a produção, calculando-se, dessa forma, o custo do transporte por tonelada de lodo.

Assim, tem-se:

$$CT = (Pf \times Cap^{-1}) \times 2D \quad \text{Eq. 4 (adaptação da fórmula 3)}$$

em que:

CT = custo de transporte (US\$);

Pf = fator indicativo do preço médio do frete no mercado por km (US\$/km);

Cap = capacidade de carga (transporte) do caminhão (m³); para este estudo, a capacidade de carga do caminhão foi medida em tonelada (t);

2 = distância multiplicada por 2, pois considera a viagem de ida e volta;

D = distância (km).

O valor médio do frete no mercado nacional é de US\$1,5/km, conforme Silva et. al (2007).

5.6 Análise energética

A análise energética estima a energia consumida de forma direta e/ou indireta dentro de um fluxo (HESLES, 1981), avalia as entradas (inputs) e saídas (outputs) de energia dos sistemas e permite correlação entre os diversos campos de conhecimento (BUENO, 2002).

De acordo com Mello (1986), índices que relacionam entradas e saídas num sistema devem ser elaborados para orientação no melhor uso de energia.

Avançando em direção à sustentabilidade e análises energéticas de explorações agrícolas, Risoud (1999) utiliza índices que avaliam o uso de energias renováveis, denominados de balanço energético e eficiência energética:

$$\text{Balanço energético} = \sum \text{saídas úteis} - \sum \text{entradas de energias não-renováveis} \quad \text{Eq. 5}$$

$$\text{Eficiência energética} = \frac{\sum \text{saídas úteis}}{\sum \text{entradas de energias não-renováveis}} \quad \text{Eq. 6}$$

A utilização desses índices permite qualificar o quanto os sistemas são dependentes da energia proveniente de fontes não-renováveis.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os objetivos desta tese são avaliar o balanço e a eficiência energética do tratamento de esgoto e do tratamento, carregamento e transporte do lodo de esgoto. Para isso, é necessário avaliar anteriormente as entradas de energia em cada uma dessas etapas.

Ainda, calcular a relação benefício custo do uso deste insumo para fins de fertilização do solo e confrontar os custos de transporte com a economia gerada pela substituição do adubo químico também são objetivos deste estudo.

Dessa forma, para melhor entendimento, os resultados e suas discussões foram organizados nessa estrutura. Assim, tem-se a análise energética das entradas, balanço e eficiência, nessa ordem, do tratamento de esgoto, lodo de esgoto, carregamento e transporte, respectivamente.

6.1 Análise energética

6.1.1 Entradas energéticas

6.1.1.1 Tratamento de esgoto

Tabela 5. Participação energética diária, por fonte, forma e total, no setor 1 (elevatória de esgoto bruto) (MJ).

Fonte e forma	Motob. Centrífuga		Sopradores		Motorredutores	
	Entrada	%	Entrada	%	Entrada	%
Biológica	0,26	0	0,26	$3 \cdot 10^{-3}$	0,26	0,10
Mão-de-obra	0,26	---	0,26	$3 \cdot 10^{-3}$	0,26	0,10
Fóssil	0,27	0	0,07	$9 \cdot 10^{-4}$	0,07	0,03
Graxa	0,27	---	0,07	$9 \cdot 10^{-4}$	0,07	0,03
Industrial	38.134,38	100	7.627,68	100	257,36	99,87
Máquinas	6,06	0,02	2,02	0,03	3,17	1,23
Eletricidade	38.128,32	99,98	7.625,66	99,97	254,19	98,64
Total	38.134,91	100	7.628,01	100	257,69	100

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

Tabela 6. Participação energética diária, por fonte, forma e total, no setor 2 (decantadores primários) (MJ).

Fonte e forma	Entrada	%
Biológica	0,26	0,13
Mão-de-obra	0,26	0,13
Fóssil	0,27	0,14
Graxa	0,27	0,14
Industrial	194,10	99,73
Máquinas (Raspadores)	3,46	1,78
Eletricidade	190,64	97,95
Total	194,63	100

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

Ao observar as Tabelas 5 e 6, nota-se que a maior participação energética nos setores 1 e 2 do tratamento de esgoto provém da fonte industrial, na forma de eletricidade principalmente.

O mesmo pode ser constatado através das Tabelas 7 e 8, ou seja, a eletricidade é a principal forma de energia necessária ao tratamento de esgoto em qualquer setor.

Tabela 7. Participação energética diária, por fonte, forma e total, no setor 3 (aeradores) (MJ).

Fonte e forma	Entrada	%
Biológica	0,26	5. 10⁻⁴
Mão-de-obra	0,26	5. 10 ⁻⁴
Fóssil	0,53	9. 10⁻⁴
Graxa	0,53	9. 10 ⁻⁴
Industrial	57.227,10	100
Máquinas (Aeradores)	34,62	0,06
Eletricidade	57.192,48	99,94
Total	57.227,89	100

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

Tabela 8. Participação energética diária, por fonte, forma e total, no setor 4 (elevatória de esgoto tratado) (MJ).

Fonte e forma	Entrada	%
Biológica	0,26	10⁻³
Mão-de-obra	0,26	10 ⁻³
Fóssil	0,27	10⁻³
Graxa	0,27	10 ⁻³
Industrial	23.835,39	100
Máquinas (Motobombas)	5,19	0,02
Eletricidade	23.830,20	99,98
Total	23.835,92	100

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

Esse fato é menos preocupante quando se pensa que a eletricidade é uma forma de energia renovável que nos permite, assim como o uso do lodo de esgoto na agricultura, redução na dependência de petróleo como já discutido anteriormente.

Com isso, sabe-se que também a produção do lodo contribuiria para sistemas de produção agrícola energeticamente sustentáveis.

O emprego do lodo de esgoto na agricultura permitiria de fato a redução na dependência de uso do petróleo visto que em todo tratamento de esgoto e sua conseqüente produção de lodo, predomina o emprego de formas renováveis de energia, embora as fontes dependentes de petróleo também sejam necessárias ao longo dessa cadeia de tratamento, como seguem demonstrando as demais Tabelas.

6.1.1.2 Tratamento de lodo de esgoto

Tabela 9. Participação energética diária, por fonte, forma e total, no setor 5 (adensadores) (MJ).

Fonte e forma	Entrada	%
Biológica	0,26	0,2
Mão-de-obra	0,26	0,2
Fóssil	0,07	0,05
Graxa	0,07	0,05
Industrial	129,40	99,75
Máquinas (Raspadores)	2,31	1,78
Eletricidade	127,09	97,97
Total	129,73	100

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

Tabela 10. Participação energética diária, por fonte, forma e total, no setor 6 (biodigestores) (MJ).

Fonte e forma	Recirculadores		Motob. Alimentação		Motob. Homogeneização	
	Entrada	%	Entrada	%	Entrada	%
Biológica	0,26	0,14	0,26	0,01	0,26	0,03
Mão-de-obra	0,26	0,14	0,26	0,01	0,26	0,03
Fóssil	0,27	0,14	0,20	8.10⁻⁴	0,31	0,03
Lubrificante	---	---	0,20	8.10 ⁻⁴	0,31	0,03
Graxa	0,27	0,14	---	---	---	---
Industrial	192,26	99,72	2543,62	99,98	954,94	99,94
Máquinas	1,62	0,84	1,73	0,07	1,73	0,18
Eletricidade	190,64	98,88	2.541,89	99,91	953,21	99,76
Total	192,79	100	2.544,08	100	955,51	100

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

O tratamento do lodo de esgoto caracteriza a parte conclusiva do tratamento de esgoto na ETE de Franca.

As Tabelas 9 e 10 anteriores e, 11 e 12 a seguir, que exprimem a participação energética por fonte, forma e total de todos os setores do tratamento do lodo de esgoto, mostram que ocorre aqui, o mesmo que na primeira parte do tratamento de esgoto.

Portanto, o que predomina na participação energética é a fonte industrial na forma de eletricidade ao longo de todos os setores, desde elevatória de esgoto bruto até a elevatória de esgoto tratado.

A Figura 1 da página 30 mostra que o biodigestor do setor 6 do tratamento de lodo de esgoto libera gás metano como co-produto, que por sua vez é totalmente queimado.

Existe a possibilidade de reaproveitamento desse gás para produção de energia elétrica. Contudo, são necessários estudos que provem a possibilidade e viabilidade de um projeto como esse.

Supondo que isso fosse possível, pode-se concluir que toda ou pelo menos, parte da energia elétrica necessária ao tratamento de esgoto e de lodo de esgoto viria de dentro do próprio sistema de tratamento, tornando esse processo praticamente auto-sustentável.

Tabela 11. Participação energética diária, por fonte, forma e total, setor 7 (filtro-prensa) (MJ).

Fonte e forma	Filtro-prensa		B. Aliment.		Batedores	
	Entrada	%	Entrada	%	Entrada	%
Biológica	0,26	8.10^{-3}	0,26	$1,4.10^{-2}$	0,26	0,04
Mão-de-obra	0,26	8.10^{-3}	0,26	$1,4.10^{-2}$	0,26	0,04
Fóssil	2,12	0,07	0	0	0,41	0,07
Lubrificante	---	---	---	---	0,41	0,06
Graxa	2,12	0,07	---	---	---	---
Industrial	3.182,55	99,93	1.907	99,99	635,7	99,89
Máquinas	5,19	0,17	0,58	0,03	0,23	0,03
Eletricidade	3.177,36	99,76	1.906,42	99,96	635,47	99,86
Total	3.184,93	100	1.907,26	100	636,37	100

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

Continuação da Tabela 11.

Fonte e forma	Correa		B. Polímero		Motob. Lav.	
	Entrada	%	Entrada	%	Entrada	%
Biológica	0,26	0,03	0,26	0,2	0,26	0,01
Mão-de-obra	0,26	0,03	0,26	0,2	0,26	0,01
Fóssil	0,07	7.10^{-3}	0	0	0	0
Graxa	0,07	7.10^{-3}	---	---	---	---
Industrial	954,65	99,97	127,26	99,8	1.906,65	99,99
Máquinas	1,44	0,15	0,17	0,14	0,23	0,02
Eletricidade	953,21	99,82	127,09	99,66	1.906,42	99,97
Total	954,98	100	127,52	100	1.906,91	100

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

Tabela 12. Participação energética diária, por fonte, forma e total, setor 8 (elevatória de esgoto tratado) (MJ).

Fonte e forma	Motob. Centrífuga		Motob. Retorno		Motob. Água	
	Entrada	%	Entrada	%	Entrada	%
Biológica	0,26	10⁻³	0,26	2,7.10⁻³	0,26	9.10⁻³
Mão-de-obra	0,26	10 ⁻³	0,26	2,7.10 ⁻³	0,26	9.10 ⁻³
Fóssil	0,27	10⁻³	0,07	7.10⁻⁴	0,61	2,1.10⁻²
Lubrificante	---	---	---	---	0,61	0,02
Graxa	0,27	10 ⁻³	0,07	7.10 ⁻⁴	---	---
Industrial	23.835,39	100	9.534,10	100	2.859,97	99,97
Máquinas	5,19	0,02	2,02	0,02	0,35	0,01
Eletricidade	23.830,20	99,98	9.532,08	99,98	2.859,62	99,96
Total	23.835,92	100	9.534,43	100	2.860,84	100

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

6.1.1.3 Carregamento

Tabela 13. Participação energética diária, por fonte, forma e total, no carregamento do lodo (MJ).

Fonte e forma	Entrada (MJ)	Porcentagem (%)
Biológica	0,11	0,03
Mão-de-obra	0,11	0,03
Fóssil	328,41	99,40
Óleo Diesel	319,59	96,73
Lubrificante	5,59	1,69
Graxa	3,23	0,98
Industrial	1,86	0,56
Retroscavadeira	1,86	0,56
Total	330,38	100

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

No carregamento do lodo de esgoto para transporte até o local de aplicação ocorre situação diferente do observado até aqui.

Como já dito anteriormente, o tratamento de esgoto requer pouca energia de origem fóssil.

No entanto, o carregamento do lodo resultante de tratamento é feito com retroscavadeira cuja principal fonte de energia é de origem fóssil, na forma de óleo diesel.

Nessa etapa de destinação do lodo na agricultura, mais de 99% da energia empregada é origem fóssil, sendo 96,73% na forma de óleo diesel, 1,69% na forma de lubrificante e 0,98% na forma de graxa, como mostra a Tabela 13.

6.1.1.4 Transporte

Tabela 14. Participação energética diária, por fonte, forma e total, transporte do lodo de esgoto (MJ).

Fonte e forma	Entrada (MJ)		Porcentagem (%)
Biológica	0,18		0,01
Mão-de-obra	0,18		0,01
Fóssil	1.771,84		99,85
Óleo Diesel	1.757,75		99,06
Lubrificante	11,18		0,63
Graxa	2,91		0,16
Industrial	2,43		0,14
Caminhão Basculante	2,43		0,14
Total	1.774,45		100

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

A participação energética no transporte do lodo ao local de aplicação possui comportamento similar ao carregamento (Tabela 14).

Assim como a retroscavadeira, a principal fonte de energia do caminhão responsável pelo transporte é de origem fóssil, na forma de óleo diesel.

6.1.2 Balanço Energético

O balanço energético é a diferença entre a saída total de energia e o somatório das entradas de energias não-renováveis.

Esse índice é usado para indicar a sustentabilidade de um sistema através da análise energética. Assim, quanto maior o balanço energético de determinada atividade, maior sua sustentabilidade energética.

Balanço energético = \sum saídas úteis (produção diária) - \sum entradas de energias não-renováveis (consumo diário) (Eq. 5)

Σ saídas úteis = 21.250,00 MJ/t (poder calorífico do LE) x 40,00 t (produção diária) = 850.000,00 MJ

Σ saídas úteis = 21.250,00 MJ/t (poder calorífico do LE) x 16,00 t (transporte diário) = 340.000,00 MJ

Tabela 15. Balanço energético de tratamento de esgoto, tratamento, carregamento e transporte de lodo (toneladas).

		Tratamento de		Carregamento	Transporte
		Esgoto	Lodo de esgoto	Lodo de esgoto	
Σ entradas de energias renováveis	Energia biológica	1,56	3,38	0,11	0,18
	Energia industrial	127.276,01	48.763,49	1,86	2,43
Σ entradas de energias não-renováveis	Energia fóssil	1,48	4,40	328,41	1.771,84
Balanço energético		849.998,52	849.995,60	339.671,59	338.228,16

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

De acordo com a Tabela 15, o tratamento de esgoto e de lodo de esgoto são atividades com balanço energético alto, e, portanto são sustentáveis energeticamente.

Por outro lado, embora o carregamento e o transporte de lodo possuam balanço energético baixo, também apontam sustentabilidade energética visto que o valor desses balanços são positivos.

6.1.3 Eficiência Energética

Tal como o balanço, a eficiência energética é também um índice de sustentabilidade, calculado pela razão entre a saída total de energia e o somatório das entradas de energias não-renováveis. Portanto, quanto maior a eficiência energética, mais sustentável energeticamente é uma atividade.

Eficiência energética = \sum saídas úteis / \sum entradas de energias não-renováveis (consumo diário)
(Eq. 6)

Tabela 16. Eficiência energética de tratamento de esgoto, tratamento, carregamento e transporte de lodo (toneladas).

		Tratamento de		Carregamento	Transporte
		Esgoto	Lodo de esgoto	Lodo de esgoto	
\sum entradas de energias renováveis	Energia biológica	1,56	3,38	0,11	0,18
	Energia industrial	127.276,01	48.763,49	1,86	2,43
\sum entradas de energias não-renováveis	Energia fóssil	1,48	4,40	328,41	1.771,84
Eficiência energética		574.324,32	193.181,81	1.035,29	191,89

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

A Tabela 16 indica, da mesma forma que a tabela anterior, que o tratamento de esgoto e de lodo de esgoto são atividades com eficiência energética alta, ao contrário do que ocorre com o carregamento e o transporte de lodo.

Contudo, todas as atividades em estudo são energeticamente sustentáveis também quando analisadas por esse índice.

6.2 Custo de transporte x Valor do fertilizante transportado

$$CT = (Pf \times Cap^{-1}) \times 2D \text{ (adaptada de Silva et. al, 2007)} \quad (\text{Eq.4})$$

em que:

CT = custo de transporte (US\$);

Pf = preço médio do frete no mercado por km (US\$) = US\$1,5/km

Preço do dólar em agosto de 2009 = R\$ 1,76

Pf = preço médio do frete por km (R\$) = US\$1,5/km x R\$ 1,76 = R\$2,64/km

Cap = capacidade de carga do caminhão em estudo (t) = 16 t

2 = distância multiplicada por 2, pois considera a viagem de ida e volta;

D = distância (km) = 25 km

$$CT = \{Pf \text{ (R\$/km)} \times Cap^{-1} \text{ (t)}\} \times 2D \text{ (km)}$$

$$CT = (2,64 \times (16)^{-1}) \times 2 \times 25$$

$$CT = \text{R\$ } 8,25/\text{t}$$

O custo com transporte é o fator mais limitante para viabilizar economicamente a reciclagem agrícola do lodo de esgoto (ANDREOLI et al., 1999; BETTIOL & CAMARGO, 2000), comprometendo dessa forma, a vantagem inicial deste resíduo (SILVA et al., 2002).

Silva et al. (2002) defendem que a distância máxima a ser percorrida deve ser aquela em que a capacidade fertilizadora do lodo de esgoto, e seu correspondente químico, sejam iguais do ponto de vista do valor de frete.

Com esse intuito, foi montada a Tabela 17.

Tabela 17. Quantidades em massa, energia e preço de N, P₂O₅ e K₂O fornecidos por um caminhão com capacidade de carga de 16 toneladas.

	Massa (kg)	Energia (MJ)	Preço (R\$)
Lodo	1,6.10 ⁴	3,4.10 ⁴	---
N	1.265,60	79.530,30	1.506,06
(P ₂ O ₅)	169,60	1.677,34	113,63
(K ₂ O)	10,08	96,97	19,86
Total	1.445,28	8.1304,62	1.639,55

Fonte: Dados de pesquisa (2009).

De acordo com a Tabela 17 conclui-se que um caminhão com capacidade de carga de 16 toneladas transporta aproximadamente 1,27 toneladas de nitrogênio, 170 quilos de fósforo e 10 quilogramas de potássio. Essa quantidade total de fertilizante industrial custa o equivalente a R\$ 1.639,55; dividindo esse valor por 16 (que é a capacidade de carga do caminhão), observa-se que cada tonelada de lodo de esgoto carrega consigo R\$102,47 em fertilizantes industriais (N, P₂O₅ e K₂O).

Contrastando os dados da Tabela 17 e da Equação 3, pode-se afirmar que para o caso em estudo, o transporte do lodo de esgoto é vantajoso, pois o custo deste (R\$8,25 por tonelada de lodo) é doze vezes menor do que o preço em fertilizantes que o insumo oferece (R\$102,47).

Por fim, os índices energéticos adotados para os macronutrientes, consideram os custos energéticos para produção desses fertilizantes. Dessa forma, pode-se afirmar que essa massa de lodo de esgoto permite a economia 81304,62 MJ de energia de origem fóssil, que seriam necessárias na produção de N, P e K.

7 CONCLUSÕES

Todas as atividades analisadas neste estudo foram energeticamente eficientes.

O uso do lodo de esgoto na agricultura permitiu a economia de fertilizantes industriais, o que gerou redução de gastos na compra desses insumos e de uso de petróleo na fabricação dos mesmos.

O transporte do lodo é compensador, pois o preço da quantidade de fertilizantes por ele oferecida é maior do que o preço de seu frete.

A eletricidade é a principal forma de energia necessária ao tratamento de esgoto e de lodo. Portanto, para todas as Estações de Tratamento de Esgotos que adotam o mesmo tratamento utilizado na ETE de Franca, propõe-se o uso do gás produzido no setor 6 (biodigestores) na geração de energia elétrica. Dessa forma, toda energia necessária ao tratamento de esgoto e de lodo seria gerada dentro do próprio sistema, tornando-o energeticamente sustentável.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A IMPORTÂNCIA do tratamento de esgotos sanitários. Disponível em:
<<http://www.fec.unicamp.br/~bdta/esgoto/importancia.html>> Acesso em 25 de agosto 2009.

ALMEIDA, L. C. F. de. **Avaliação energética econômica da cultura do milho em assentamento rural, Iperó-SP**; Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP); Botucatu; 2007.

ALVES FILHO, D. C., NEUMANN, M., RESTLE, J., SOUZA, A. N. M. de, PEIXOTO, L. A. de O. Características agronômicas produtivas, qualidade e custo de produção de forragem em pastagem de azevém (*Lolium multiflorum* Lam) fertilizada com dois tipos de adubo. **Cienc. Rural**, v. 33, n.1, p.143-149, jan./fev. 2003.

ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de biossólidos: transformando problemas em soluções**. Curitiba: Sanepar; Finep, 1999. 288p.

BANSAL, R.K., KSHIRSAGAR, K.G., SANGLE, R.D. Efficient utilization of energy with an improved farming system for selected semi-arid tropics. **Agric., Ecosyst. Environ.**, v.24, n4, p.381-94, 1988.

BEBER, J. A. C. **Eficiência energética e processos de produção em pequenas propriedades rurais. Agudo, RS**. Santa Maria, 1989. 295 p. Dissertação (Mestrado em Extensão Rural) – Universidade Federal de Santa Maria (RS).

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 312p.

BEZERRA, F.B., OLIVEIRA, M. A. C. L. de, PEREZ, D. V., ANDRADE, A. G. de, MENEGUELLI, N. do A. Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.41, n.3, p.469-476, mar. 2006

BOYELDIEU, J. Rendement énergétique de la production agricole: les bilans d'énergie. **Agriculture**, Paris, v.386, p.124- 128,1975.

BRASIL. **Balanco energético nacional 2007**. Brasília: MME, 2007. Disponível em:<<http://www.mme.gov.br>> Acesso em: 25 de setembro de 2009.

BUENO, O. de C.; CAMPOS, A. T.; CAMPOS, A. T. Balanço de energia e contabilização da radiação global: simulação e comparativo. In: AVANCES EM INGENIERÍA AGRÍCOLA, 2000, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía, 2000 p. 477-482.

BUENO, O. de C. **Análise energética e eficiência cultural do milho em assentamento rural, Itaberá/SP**; Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP); Botucatu; 2002.

CAMPOS, A. T. **Balanco energético relativo à produção de feno de “coast-cross” e alfafa em sistema intensivo de produção de leite**. 2001. 236f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Curso de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

CAMPOS, A. T. & CAMPOS, A. T. de. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.6, p.1977-1985, nov-dez, 2004.

CARMO, M.S., COMITRE, V., DULLEY, R.D. Balanço energético de sistemas de produção na agricultura alternativa. **Agric. São Paulo**, v.35, n.1, p.87-97, 1988.

CARVALHO, A. de; GONÇALVES, G. G.; RIBEIRO, J. J. C. **Necessidades energéticas de trabalhadores rurais e agricultores na sub-região vitícola de “Torres”**. Oeiras: Instituto Gulbencvkian de Ciência, Centro de Estudos de Economia Agrária, 1974. 79p.

CASTANHO FILHO, E. P. & CHABARIBERY, D. **Perfil energético da agricultura paulista**; Relatório de pesquisa; IEA – Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Governo do Estado de São Paulo; São Paulo; setembro; 1982.

CLEVELAND, C. J. The direct and indirect use of fossil fuels and electricity in USA agriculture, 1910-1990. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.55, n.2, p.111-121, 1995.

COMITRE, V. **Avaliação energética e aspectos econômicos da filière soja na região de Ribeirão Preto – SP**. 1993. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Agrícola/Planejamento Agropecuário) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1993.

CONAMA. Resolução N°359 de 29 de agosto de 2006.

COSTANTINI, E.O.C. Bilancio energetico e bilancio economico delle colture nella painura padana. **Genio Rurale**, v.45, p.11-17, 1982.

FAO. **El estado mundial de la agricultura y La alimentacion**. Roma: FAO, 1976. 158 p.

FARIA, C. **Tratamento de esgoto**. Disponível em:

<<http://www.infoescola.com/geografia/tratamento-de-esgoto/>> Acesso em 20 de agosto 2009.

FELIPE JR., G. Considerações sobre a evolução da indústria de fertilizantes nitrogenados. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1, 1984, Brasília. **Anais...** Brasília: EMBRAPA-DEP, 1984. p.21-71.

FERREIRA, W.A., ULBANERE, R.C. Análise do balanço econômico para a produção de milho no estado de São Paulo. **Energ. Agric. (Botucatu)**, v.4, n.2, p.8-18,1989.

FLUCK, R. C. Energy productivity: a measure of energy utilization in agricultural systems. **Agricultural Systems**, Essex, UK, v.4, n.1, p.29-37, 1979.

FRANK, R. The use of biosolids from wastewater treatment plants in agriculture.

Enviromental Management, New York, v.9, n. 4, p. 165-169, Apr. 1998.

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

GIAMPIETRO, M, CERRETELLI, G., PIMENTEL, D. Energy analysis of agricultural

ecosystem management: human return and sustainability. **Agric., Ecosyst. Environ.**, v.38, n.3, p.219-44, 1992.

GONÇALVES, F. T. de A. **Dinâmica do nitrogênio em solo tratado com lodo de esgoto e cultivado com café**; Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical/ Gestão dos Recursos Agroambientais) – Instituto Agronômico de Campinas (IAC); Campinas; 2005.

GUEDES, M. C., ANDRADE, C. A. de, POGGIANI F., MATTIAZZO, M. E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **R. Bras. Ci. Solo**, 30: 267-280, 2006.

HESLES, J. B. S. **Objetivos e princípios da análise energética, análise de processos industriais, análise energética: métodos e convenções**. Rio de Janeiro. Preprint AIE-COPPE/UFRJ, 1981. 137p.

JUNQUEIRA, A. A. B.; CRISCUOLO, P. D.; PINO, F. A. O uso da energia na agricultura paulista. **Agric. em São Paulo**, São Paulo, v. 29, tomos I e II, p. 55-100, 1982.

KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. Flórida: CRC Press, 1992. 365p.

KROM, V., PACCOLA, A.A. Aspectos energéticos das mudanças do setor agrícola de quatro microrregiões do estado de São Paulo. **Energ. Agric. (Botucatu)**, v.10, n.3, p.24-31, 1995.

LAMBAIS, M. R., CARMO, J. B. do. Impactos da aplicação de biossólidos na microbiota de solos tropicais. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 1129-1138, 2008.

LEACH, G. **Energy and food production**. London: International Institute for Environment and Development, 1976. 192p.

LOCKERETZ, W. **Energy inputs for nitrogen, phosphorus and potash fertilizers; Handbook of energy utilization in agriculture**; CRC Press Inc.; Flórida; 1980.

MACHADO, C. C. **Elementos básicos do transporte florestal rodoviário**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2000. 167p.

MACHADO FILHO, L. C. P., SILVEIRA, M. C. A. C. da, HÖTZEL, M. J., MACHADO, L. C. P. **Produção agroecológica de suínos – uma alternativa sustentável para a pequena propriedade no Brasil**. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL VIRTUAL SOBRE QUALIDADE DE CARNE, 2., 2001, Florianópolis. Anais... Florianópolis: UFSC, 2001. p.1-18.

MAHAN, L. K.; ESCOTT-STUMP, S.; KRAUSE, M. V. **Krause: alimentos, nutrição e dietoterapia**. 9. ed. São Paulo: Roca, 1998. 1179 p.

MALASSIS, L. **Économie Agro-alimentaire I: économie de la consommation et de la production agro-alimentaire**. Paris: Ed. Cujas, 1973. 437p.

MALTA, T. S. **Aplicação de lodos de estações de tratamento de esgotos na agricultura: estudo do caso do município de Rio das Ostras - RJ**. 2001. 68 p. Dissertação (Mestrado) Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, 2001.

MARQUES, M. O.; MELO, W.J.; MARQUES, T. A. Metais pesados e o uso do bio-sólido na agricultura. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. de C. T. de; MELFI, A. J.; MELO, W. J. de; MARQUES, M.O. (Ed.). **Bio-sólidos na Agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. p.365-403.

MELLO, R. **Análise energética de agroecossistemas: o caso de Santa Catarina**. 1986. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 1986.

MELO, W.J. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Rio de Janeiro, 20-26 de julho de 1997.

MELO, W. J.; MARQUES, M.O.; MELO, V. P. O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. de C. T. de; MELFI, A. J.; MELO, W. J. de; MARQUES, M.O. (Ed.). **Biossólidos na Agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. p.289-363.

MELO, V. P. de. **Propriedades químicas e disponibilidade de metais pesados para a cultura do milho em dois latossolos que receberam a adição de biossólido**. 2002. 134f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2002.

MORATELLI, R. F., BAIIO, F. H. R. **Contraste de custos das operações mecanizadas na cana-de-açúcar por um sistema de autodirecionamento via satélite versus um sistema tradicional de demarcação**. In: Encontro de iniciação científica da UFMS, X, 2006, Santa Maria. Anais... Santa Maria: UFSM, 2006.

NASCIMENTO, C.W.A.; BARROS, D.A.S.; MELO, E.E.C.; OLIVEIRA, A.B. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.385-392, 2004.

PANESAR, B.S., FLUCK, R.C. Energy productivity of a production system: analysis and measurement. **Agric. Syst.**, v.43, n.4, p.415-37, 1993.

PELLIZZI, G. Use of energy and labour in Italian agriculture. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 52, n. 2, p. 111-9, 1992.

PIGOZZO, A. T. J. **Disposição de lodo de esgoto: acúmulo de metais pesados no solo e em plantas de milho (*Zea mays L.*)**. 2003. 200p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na

Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

PIMENTA, H. C. D., TORRES, F. R. M., RODRIGUES, B. S., ROCHA JÚNIOR, J. M. da. O esgoto: a importância do tratamento e as opções tecnológicas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 22. 2002. Curitiba. **Anais...** Curitiba: Encontro nacional de engenharia de produção, 2002.

Preços médios mensais pagos pela agricultura. Disponível em:

<http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea/Precos_Medios.aspx?cod_sis=5> Acesso em 13 de outubro de 2009

QUINTANA, N. R. G. **Análise econômica da aplicação de biossólido na agricultura.** 2006. 2006. 111 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

QUINTANA, N.R.G., BUENO, O. de C., CARMO, M. S. do, MELO, W. J. de. Estimativa do Poder Calorífico do Lodo de Esgoto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 6. 2008, Salvador. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, 2008. CD_ROM.

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

RELATÓRIO CONVÊNIO. **Biossólido na Agricultura.** 2001.

RISOUD, B. Développement durable et analyse énergétique d'exploitations agricoles. **Économie Rurale**, n. 252/juillet-août, 1999, p.16-27.

- ROCHA, M. T. & SHIROTA, R. Disposição final de lodo de esgoto. **Revista de estudos ambientais**, v.1, n.3, p.1-24, set/dez 1999.
- ROCHA, G. N.; GONÇALVES, J.L.M.; MOURA, I.M. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biosólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.623-639, 2004.
- SABBEY, B.R. **The use of sewage sludge as a fertilizer. Environmental Engineering Series.** London, 72:108-112, 1974.
- SCHROLL, H. Energy-flow and ecological sustainability in Danish agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.51, n.3, p.301- 310, 1994.
- SEIXAS, J.; MARCHETTI, D. **Produção e consumo de energia na agricultura.** Planaltina: EMBRAPA - Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, 1982. 15p. (EMBRAPA-CPAC. Documentos, 3).
- SILVA, J.G., GRAZIANO, J.R. A crise de energia: repensar também a pesquisa agrônômica. **Ciênc. Cult. (São Paulo)**, v.29, n10, p.1110-6, 1977.
- SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S. & SHARMA, R.D. Alternativa agrônômica para o biossólido produzido no distrito federal. II – Aspectos qualitativos, econômicos e práticos de seu uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.497-503, 2002.
- SILVA, M. L. da; OLIVEIRA, R. J. de; VALVERDE, S. R.; MACHADO, C. C; PIRES, V. A. V. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.6, p.1073-1079, 2007.
- SIQUEIRA, R.; GAMERO, C. A.; BOLLER, W. Balanço de energia na implantação e manejo de plantas de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.19, n.1, p.80-89, 1999.

SOUZA, W. J. O. **Fósforo em solo tratado com biossólido e cultivado com milho.** 2004. 92p. Tese (Doutorado em Agronomia/Produção Vegetal)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

TAKAMATSU, A. A. **Microbiologia Ambiental. Lodo.** Disponível em:
<<http://www.geocities.com/RainForest/2038/envmicro/Sludgep.htm>> Acesso em 20 de agosto 2004.

TRANNIN I. C. B. **Avaliação agronômica de um biossólido industrial e de seus efeitos sobre atributos do solo.** 2004. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia/ Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

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

TSATSARELIS, C.A. Energy inputs and outputs for soft winter wheat production in Greece. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.43, n.2,p.109-118, 1993.

TSUTIYA, M. T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. de C. T. de; MELFI, A. J.; MELO, W. J. de; MARQUES, M.O. (Ed.). **Biossólidos na Agricultura.** São Paulo: SABESP, (2001) p. 89-131.

ULBANERE, R. C. **Análise dos balanços energéticos e econômicos relativa à produção de grãos de milho no estado de São Paulo.** Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP); Botucatu; 1988.

VANZO, J. E., MACEDO, L.S., TSUTIYA, M.T. ETE Franca: uma estação que além de tratar os esgotos, produz insumos agrícolas. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE

ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27. 2000, PORTO ALEGRE. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

ZORATTO, A. C. A importância do tratamento de esgoto doméstico no saneamento básico. In: FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA, 2. 2006, TUPÃ. **Anais...** Tupã: Amigos da Natureza, 2006.