UTILIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO NA AGRICULTURA: UM ESTUDO DE CASO PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ

MARCELO THEOTO ROCHA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **RICARDO SHIROTA**

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciência,
Área de Concentração: Economia Aplicada.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Novembro, 1998

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Rocha, Marcelo Theoto

Utilização de lodo de escoto na agricultura: um estudo de caso para as bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. - - Piracicaba, 1998.

140 p. : il.

Dissertação (mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1998.
Bibliografia.

1. Aspecto econômico 2. Economia aplicada 3. Investimento 4. Legislação ambiental 5. Lodo de esgoto 6. Reciclagem 7. Saneamento ambiental 8. Saneamento básico I. Título

CDD 628.3

Errata

Pag.

- xi No título do resumo, onde se lê “*APLICAÇÃO*”, leia-se “*UTILIZAÇÃO*”
- xi No segundo parágrafo, onde se lê “... *lodo de esgoto é fundamental ...*”, leia-se “... *lodo de esgoto (LE) é fundamental ...*”
- xiii No título do abstract, onde se lê “*APPLICATION*”, leia-se “*UTILIZATION*”
- 18 Onde se lê “*Substituindo a Equação 8 na Equação 7:*”, leia-se “*Substituindo a Equação 9 na Equação 8:*”
- 45 Na Tabela 7, onde se lê “*(% MS)^b*”, leia-se “*(%)^b*”
- 65 No terceiro parágrafo onde se lê “... *são incineradas, (helmintos e protozoários) a fim de ...*”, leia-se “... *são incineradas, a fim de ...*”
- 66 Na nota de rodapé, leia-se “... *aos locais dos incineradores, em agosto de 1998.*”
- 77 No segundo parágrafo, onde se lê “*Gráfico 1*”, leia-se “*Gráfico 11*”
- 90 No terceiro parágrafo onde se lê “*pag. 73*”, leia-se “*pag. 96*”. Onde se lê “*patógenos*”, leia-se “*vetores*”
- 97 No final do segundo parágrafo, acrescentar “... *(Shirota & Rocha, 1997).*”
- 101 Na fonte da Tabela 31, leia-se “*Tabela 23*” ao invés de “*Tabela 24*”
- 108 No segundo parágrafo, onde se lê “*CEPEA³⁹*”, leia-se “*CEPEA⁴³*”
- 110 No final do terceiro parágrafo, onde se lê “... *custos de monitoramento...*”, leia-se “... *custos de legislação...*”
- 116 No terceiro parágrafo, onde se lê “... *é de R\$ 191,53 (R\$ 454.973, 68 + R\$ 70.575,15 / 2.744 toneladas de sólido secos)...*”, leia-se “... *é de R\$ 42,30 [(R\$ 45.497,36 + R\$ 70.575,15) / 2.744 toneladas de sólido secos]⁵⁰...*”
- 116 Incluir nota de rodapé número “50”:
“⁵⁰ *Supõe-se uma vida útil do equipamento de 10 anos e uma depreciação linear. Assim, o custo anual do capital seria de R\$ 45.497,36.*”
- 119 Substituir a numeração da nota de rodapé de 50 por 51

"Tudo é bom... tudo.
O homem é infeliz porque não sabe que é feliz.
Só por isto. Isto é tudo... tudo.
Quem perceber isto será feliz logo, imediatamente
no mesmo instante..."

Dostoiévski

Agradecimentos

Ao Departamento de Economia e Sociologia Rural da ESALQ/USP a formação acadêmica e as amizades que me proporcionou.

Ao Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), a formação profissional e o apoio financeiro, e também as amizades. Em especial aos pesquisadores Valter Bertini Galan e Sérgio De Zen e ao Prof. Dr. Geraldo Sant'Ana de Camargo Barros.

Ao CNPQ o apoio financeiro, sem o qual esta dissertação não seria possível.

Ao Prof. Dr. Ricardo Shirota a orientação e o voto de confiança em minha capacidade profissional. Além da orientação agradeço também a amizade e outros conhecimentos que me foram passados. Espero ter retribuído com amizade e algum conhecimento.

Aos meus pais, Armando e Marly, que sempre me incentivaram a pesquisar, investigar e questionar. Foi através deles que aprendi a importância da Ciência e do Conhecimento.

Aos meus amigos que me compreendem e incentivam, em especial Fernanda, que antes de tudo é uma grande amiga.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE GRÁFICOS.....	x
RESUMO.....	xi
SUMMARY.....	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.2 Região de estudo.....	3
1.3 Organização do trabalho.....	4
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	7
2.1 Poluição.....	7
2.2 Análise benefício custo.....	9
2.2.1 Período de recuperação do capital – Payback.....	10
2.2.2 Valor presente líquido – VPL.....	11
2.2.3 Taxa interna de retorno – TIR.....	13
2.2.4 Relação benefício custo - B/C.....	14
2.2.5 Seleção de projetos.....	14
2.3 Relação fator produto.....	17
2.4 Teoria econômica para a gestão integrada de resíduos.....	20
3 A SITUAÇÃO DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL E NA REGIÃO DE ESTUDO.....	29
3.1 A situação do saneamento básico no Brasil.....	33
3.2 A situação do saneamento básico na região de estudo.....	37
3.3 Investimentos em saneamento básico.....	40
3.3.1 Investimentos nacionais.....	40
3.3.2 Investimentos municipais.....	41
4 LODO DE ESGOTO.....	44
4.1 Características físico-químicas do LE.....	45

4.2 Contaminantes e seus riscos.....	49
4.2.1 Contaminantes químicos.....	50
4.2.1.1 Metais pesados.....	50
4.2.1.2 Contaminantes químicos orgânicos.....	55
4.2.2 Contaminantes biológicos.....	55
5 ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DE ESGOTO.....	59
5.1 Aplicação em áreas degradadas.....	62
5.2 Disposição em aterros sanitários.....	64
5.3 Incineração.....	65
5.4 Disposição no mar.....	66
5.5 Aplicação na agricultura e em florestas.....	67
5.5.1 Dosagens de aplicação de LE.....	69
5.5.2 Respostas das culturas.....	75
5.5.3 Custos de aplicação de LE na agricultura e em florestas.....	76
5.5.4 Outras formas de aplicação do LE na agricultura e em florestas.....	79
5.6 Participação pública.....	81
6 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL.....	86
6.1 Legislação norte-americana – a “503”.....	87
6.2 Legislação brasileira.....	91
7. DEMANDA POTENCIAL E CUSTOS DE APLICAÇÃO DE LE NA AGRICULTURA EM LIMEIRA.....	97
7.1 Demanda potencial no setor agropecuário.....	98
7.1.1 Critério de risco.....	99
7.1.2 Critério de estudos realizados.....	100
7.2 Custos de aplicação de LE na agricultura no município de Limeira.....	102
7.3 Desenvolvimento de mercado.....	111
8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	113
ANEXOS.....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Mapa da área de atuação do Comitê das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí.....	6
2. Fluxograma de uma estação de tratamento de esgoto (ETE).....	32
3. Mapa da qualidade das Águas das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí , 1993.....	38
4. Fluxograma dos passos para aplicação de LE no solo, segundo a EPA.....	96

LISTA DE TABELAS

	Página
1. Proporção de domicílios com coleta de esgoto, por grandes regiões, segundo os extratos populacionais dos municípios, Brasil, 1989 (em %).	34
2. Número de municípios com coleta e tratamento de esgoto, por tipo de tratamento, segundo as grandes regiões, Brasil, 1989.....	35
3. Volume de esgoto coletado e tratado por dia, por tipo de tratamento, segundo as grandes regiões, Brasil, 1989.....	36
4. Volume diário de esgoto coletado nas grandes regiões e esgoto coletado que recebe tratamento, Brasil, 1989.....	36
5. Informações selecionadas sobre o esgotamento sanitário nas várias bacias e sub-bacias objetos do estudo, 1993.....	39
6. População atendida por sistemas de esgotamento sanitário, bacia do Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 1993.....	39
7. Composição típica de lodo não tratado, digerido e ativado.....	45
8. Propriedades físicas típicas do lodo ativado e digerido.....	47
9. Características físico-químicas do LE segundo autores nacionais.....	47
10. Composição média dos dois principais tipos de lodo do Paraná expressa em % em relação ao peso seco.....	48
11. Características físico-químicas do lodo produzido pelas Estações de Tratamento de Esgoto de Brasília.....	49
12. Teores máximos de metais pesados admitidos no lodo a ser utilizado na agricultura, segundo a legislação de diversos países (mg/kg de matéria seca).....	54
13. Porcentagem da redução de coliformes, estreptococos fecais, salmonellas e ovos de helmintos nos tratamentos químico e térmico.....	56
14. Tempo de sobrevivência de alguns patógenos no solo.....	57
15. Produção estimada e disposição final de LE por regiões da Environmental Protection Agency, Estados Unidos, 1997.....	60
16. Produção e destino final de LE na Europa, 1990.....	61
17. Custo de capital, manutenção e operação da aplicação de LE em áreas	

degradadas, Estados Unidos, 1995.....	63
18. Comparação do nível de nutrientes entre fertilizantes químicos convencionais e lodo de esgoto.....	68
19. Resultados comparativos de macronutrientes para diversos resíduos orgânicos.....	69
20. Taxas e frequência de aplicação do LE conforme o tipo de utilização.....	70
21. Declividades recomendadas para aplicação de lodo.....	71
22. Profundidade mínima (em m) do lençol freático para a aplicação de lodo de esgoto.....	71
23. Estudos de adubação com lodo de esgoto, culturas e dosagens de aplicação	76
24. Custo de capital, manutenção e operação da aplicação de LE na agricultura, Estados Unidos, 1995.....	78
25. Custo de capital, manutenção e operação da aplicação de LE em florestas, Estados Unidos, 1995.....	78
26. Grau de abrangência dos diversos mecanismos de participação pública.....	83
27. Limites de concentração de metais pesados no LE, adotados pela EPA, para aplicação no solo.....	89
28. Requerimentos da “503” para diversos tipos de LE.....	91
29. Principais culturas no município de Limeira em 1995/6.....	99
30. Relação das culturas de menor risco, presentes no município de Limeira.....	100
31. Demanda potencial de lodo de esgoto em solos agrícolas do município de Limeira, para culturas selecionadas.....	101
32. Custo de capital, manutenção e operação da aplicação de LE na agricultura, no município de Limeira - SP, setembro/98.....	102
33. Tempo de carregamento, descarregamento e percurso interno, segundo a capacidade (galões) do veículo de aplicação de LE.....	105
34. Custos privados da disposição do LE em cidades norte-americanas e em Limeira - SP.....	111

LISTA DE GRÁFICOS

	Página
1. Variação no VPL em função da taxa de desconto.....	12
2. VPL e TIR de dois projetos hipotéticos, A e B.....	16
3. A função de receita total (RT)	19
4. As funções de produtividade-receita média (PRMe) e produtividade-receita marginal (PRMa)	19
5. Determinação do nível ótimo de reciclagem.....	21
6. Curvas de custos marginais para a disposição em aterros.....	23
7. Curvas de custos marginais para a reciclagem.....	24
8. Nível ótimo de reciclagem com utilização de crédito e taxa.....	25
9. Nível de reciclagem estabelecido através de metas.....	26
10. Certificados de reciclagem comercializáveis.....	27
11. Custos de aplicação de LE na agricultura, em florestas e em áreas degradadas, Estados Unidos, 1995.....	77

APLICAÇÃO DE LODO DE ESGOTO NA AGRICULTURA - UM ESTUDO DE CASO PARA AS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ

Autor: Marcelo Theoto Rocha

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Shirota

RESUMO

Com o desenvolvimento e crescimento do país, espera-se um crescimento dos serviços de esgotamento sanitário atingindo uma maior parcela da população. Somente na região das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, espera-se que em 2020, 5,6 milhões de habitantes sejam atendidos pelos sistemas de esgotamento. A carga total coletada será de aproximadamente 304 t DBO/dia que, se submetida a tratamento com eficiência média de 90%, será reduzida para o valor de 30 t DBO/dia. Em termos de volume, estima-se que no ano 2020, serão tratados cerca de 17.284 l/s de esgoto.

A disposição adequada do lodo de esgoto é fundamental, a fim de se evitar potenciais prejuízos ambientais. Entre as diversas alternativas para a disposição adequada do lodo de esgoto estão: aplicação em áreas degradadas, disposição em aterros sanitários, incineração, disposição no mar, aplicação na agricultura e aplicação em florestas. Todas estas alternativas possuem vantagens e desvantagens potenciais. O presente estudo mostra quais são algumas destas vantagens e desvantagens.

Atualmente, existe uma tendência mundial em se priorizar as alternativas que promovam a reciclagem do lodo, tais como a aplicação em áreas degradadas, agricultura e florestas. Tomando como exemplo a cidade de Limeira, determinou-se o custo privado da aplicação agrícola do lodo de esgoto. Baseando-se em um modelo de aplicação agrícola norte-americano, o custo total de capital para a disposição de 2.744 toneladas de sólidos secos por ano será de R\$ 454.973,68, enquanto que o custo de manutenção e operação será de R\$ 70.575,15 por ano.

Além dos custos privados, é fundamental para a determinação da escolha da melhor alternativa de disposição do lodo de esgoto, o levantamento dos custos sociais. Para tanto, o presente estudo apresenta algumas metodologias/ferramentas que poderão ser utilizadas em futuros estudos.

Independente da alternativa escolhida para a disposição final do lodo de esgoto, existe a necessidade de regulamentação, ou seja, a necessidade de impor normas e leis a fim de que determinados padrões e diretrizes sejam seguidos. No caso específico da disposição final do LE, diversos países elaboraram padrões e diretrizes de acordo com suas características culturais e de acordo com as características físico-químicas do LE. O presente estudo avalia a legislação norte-americana ("503"), mostrando quais são os seus principais pontos. A legislação brasileira que pode ser aplicada para a disposição final do LE, também é apresentada.

APPLICATION OF SEWAGE SLUDGE IN AGRICULTURE – A CASE STUDY TO PIRACICABA, CAPIVARI AND JUNDIAÍ BASIN RIVERS

Author: Marcelo Theoto Rocha

Adviser: Prof. Dr. Ricardo Shiota

SUMMARY

With the country's development and growth of the, it is expected that the service of sanitary exhaustion grows, reaching a larger portion of the population. Only in the area of the basins of the rivers Piracicaba, Capivari and Jundiaí, is expected that in 2020, 5.6 million inhabitants will be assisted by exhaustion systems. The collected total load will be of approximately 304 t DBO/day; which, if submitted to an efficiency of 90% treatment, will be reduced to 30 t DBO/day. In volume terms, it is expected that in the year 2020, about 17.284 sewer l/s will be under treatment.

Proper disposition of sewage sludge is fundamental in order to avoid potential environmental damages. Among several alternatives for the disposition of the sewage sludge are: application in degraded areas, disposition in sanitary embankments, incineration, disposition in the sea, application in agriculture and application in forests. All these alternatives present advantages and potential risks, which are pointed out by the present study.

The world tendency is prioritizing the alternatives that promote recycle of the sludge, as the application in degraded areas, agriculture and forests. Taking as example the city of Limeira, the cost of application of sewage sludge in agriculture was determined; using North American parameters. The results showed that total private cost of capital for the disposition of 2.744 tons of dry solids a year was equal to R\$ 454.973,68, while maintenance and operation's costs will equal to R\$ 70.575,15 a year.

Beyond the private costs, the determination of social costs, it's fundamental to choice between the alternatives of final disposition of sewage sludge. In this topic, the present study show some methodologies/tools that may be used in future studies..

Independently of the alternative chosen for the final disposition of the sewage sludge, there is a need for regulation, that is to say, there is a need to impose norms and laws so that certain patterns and guidelines will be followed. In the specific case of the final disposition of the sewage sludge, several countries elaborated patterns and guidelines in agreement with the cultural characteristics of each country, and in agreement with the physical-chemistries characteristics of the sewage sludge. This study analysis the North American legislation ("503") and what exists nowadays in the Brazilian case.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e crescimento econômico das nações têm levado a uma crescente urbanização. Em muitos casos, as concentrações das populações nas cidades atingem vários milhões de pessoas. No início, esta concentração estava associada à necessidade de defesa mútua contra os animais perigosos, o meio e o próprio homem. Hoje, porém, existem vários outros motivos que levam os indivíduos a procurar as cidades, entre eles: maiores oportunidades de emprego e renda, maiores níveis de educação e saúde, maiores opções de lazer e entretenimento, etc.

Infelizmente, as cidades não apresentam apenas benefícios e atrativos. Existem também vários problemas envolvendo questões de transporte, moradia, segurança e saúde, que levam as pessoas a saírem das cidades. Esses problemas diminuem o bem-estar e a qualidade de vida dos moradores, além de causar uma série de prejuízos econômicos e ambientais. Muitos deles estão diretamente associados com as altas concentrações populacionais que muitas cidades apresentam.

Um dos principais problemas que qualquer cidade enfrenta é o da coleta e tratamento dos resíduos por ela gerados. Quanto maior o número de pessoas que vive em uma determinada cidade, maior será a sua geração de resíduos. Cada resíduo possui características específicas, que levam à necessidade de diferentes formas de coleta, tratamento e disposição. Na maioria dos casos, o volume de resíduos gerados supera, em muito, a capacidade natural de assimilação do meio que circunda esses centros urbanos. O resultado é a crescente deterioração das condições ambientais com o aumento visível dos níveis de poluição. De fato, na maioria dos grandes centros urbanos existem claras

evidências de queda na qualidade do ar, dos corpos hídricos, da fauna e da flora, etc.

No caso específico dos resíduos de esgotamento sanitário, durante muito tempo os limitados investimentos nessa área dirigiam-se basicamente à construção dos sistemas de coleta. Em geral, ainda hoje, a maioria dos sistemas de esgotos existentes nas cidades brasileiras limita-se a despejar os resíduos brutos (não tratados) nos corpos d'água, sendo responsáveis por vários dos problemas de poluição dos rios e dos mares. Além da poluição *per se*, a eliminação *rio abaixo* do esgoto bruto pode gerar uma série de problemas relacionados com a saúde das pessoas que vivem nas regiões de influência desses corpos d'água.

Felizmente, é possível observar uma crescente conscientização ambiental, o que leva os indivíduos a exigir soluções para este tipo de problema. Esta conscientização, em conjunto com outros fatores, inclusive econômicos, obriga os governos e os demais agentes econômicos a realizar investimentos visando o desenvolvimento de tecnologias adequadas para o tratamento e disposição final dos resíduos sanitários.

O presente estudo pretende tecer algumas considerações sobre certas alternativas existentes para a disposição final de um dos resíduos do esgotamento sanitário: **o lodo de esgoto (LE)**. Basicamente, o lodo de esgoto nada mais é do que o resíduo biológico resultante da decomposição da matéria orgânica que existe no esgoto, ou em outras palavras: “resíduo sólido gerado pelos sistemas de tratamento de águas residuárias” (SANEPAR, 1997, p.15).

Dentre as diversas alternativas existentes de disposição final do lodo de esgoto, podem ser citadas: aterros sanitários, áreas de recuperação de solo, disposição no mar, incineração, aplicação em áreas agrícolas e/ou florestais, etc. Muitas ainda são questionadas do ponto de vista ambiental e econômico. O presente estudo pretende concentrar sua atenção na alternativa de aplicação em áreas agrícolas e/ou florestais.

1.1 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo geral apresentar algumas considerações sobre as diversas alternativas existentes para a disposição final de um dos resíduos do tratamento do esgoto urbano: o lodo de esgoto.

Para tanto, o presente estudo tem os seguintes objetivos específicos:

- apresentar um referencial teórico sobre a disposição final do lodo de esgoto;
- caracterizar o serviço de saneamento básico brasileiro;
- apontar as principais características físico-químicas do lodo de esgoto;
- caracterizar os benefícios e prejuízos existentes em cada uma das alternativas de disposição, em especial na aplicação em áreas agrícolas e/ou florestais;
- mostrar planilhas de custos, baseadas na experiência internacional, para algumas das alternativas;
- apresentar a atual legislação brasileira que pode ser aplicada à disposição do lodo de esgoto, e também a legislação norte-americana (“503”); e,
- elaborar uma simulação dos custos privados da disposição agrícola do lodo de esgoto para uma cidade da região de estudo: Limeira.

1.2 Região de estudo

Para o presente estudo foram selecionadas as bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, no Estado de São Paulo (Figura 1, pag. 6). As diferentes sub-bacias são: Atibaia, Corumbataí, Jaguari, Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Os principais rios presentes nestas sub-bacias são: Atibaia, Atibainha, Cachoeira, Camanducaia, Corumbataí, Jaguari e Piracicaba.

Esta região foi escolhida por inúmeras razões, entre elas: apresenta uma população de aproximadamente 3,6 milhões de habitantes (11% do total do Estado), concentra em importantes aglomerações urbanas, ocupando uma extensão territorial de aproximadamente 15.655 km² (6% do total do Estado); além de concentrar importantes atividades econômicas estaduais (aproximadamente 15% do Valor Adicionado Industrial)¹.

1.3 Organização do trabalho

Inicialmente é apresentado um referencial teórico para a abordagem do problema. Neste referencial são apresentadas as diversas metodologias e/ou ferramentas que poderiam ser utilizadas para avaliar economicamente o problema da disposição final do lodo de esgoto. No presente estudo não serão utilizadas estas metodologias e/ou ferramentas, ficando estas como sugestão para futuros estudos.

No capítulo 3 é feita uma breve descrição dos tipos de tratamento de esgoto, seguida de uma avaliação do setor de saneamento básico no Brasil e na região de estudo. Procura-se mostrar quais são os níveis de atendimento existentes, conforme o tipo de coleta e tratamento à disposição. São mostradas, também, os investimentos que foram efetuados e quais serão as conseqüências de tais investimentos em relação ao volume de lodo de esgoto gerado.

No capítulo seguinte, descreve-se o lodo de esgoto quanto às suas características físico-químicas, assim como quanto a possíveis contaminantes (metais pesados, patógenos, etc.) que ele possa vir a possuir. É importante salientar que conforme as características do lodo de esgoto uma determinada tecnologia para a sua disposição final pode vir a ser mais adequada ou não do ponto de vista ambiental. Os dados apresentados estão baseados na experiência internacional, pois infelizmente, no Brasil ainda não existem muitos estudos feitos nesta área.

¹ Valores referentes a 1993 (SEADE, 1995).

Uma vez caracterizado o lodo de esgoto (LE), o presente estudo apresenta as alternativas que existem atualmente para a sua disposição final, salientando os principais vantagens e prejuízos de cada uma delas. Os custos de cada uma também são apresentados. Novamente, utiliza-se a experiência internacional para ilustrar as diversas alternativas. A aplicação em áreas agrícolas e/ou florestais é estudada em maior detalhe; ela apresenta maior quantidade de informação nacional, devido em especial às experiências na cidade de Brasília e no estado do Paraná.

O próximo passo é dado no Capítulo 6, que aborda a questão da necessidade de se estabelecer uma legislação ambiental específica para a utilização do LE na agricultura e/ou florestas. Esta legislação visa proteger tanto a saúde dos agricultores, como dos consumidores, além de evitar a contaminação do meio ambiente. A título de ilustração, mostra-se também a legislação norte-americana ("503").

Por fim, elabora-se uma simulação dos custos privados da aplicação do LE na agricultura para uma cidade da região de estudo. Os resultados obtidos são analisados e discutidos, mostrando-se quais são as principais variáveis atuantes e como estas influenciam os resultados. O presente estudo se encerra com a apresentação das conclusões e recomendações a respeito das alternativas da disposição final do lodo de esgoto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo procura mostrar algumas metodologias e/ou ferramentas que existem para a avaliação das alternativas de disposição do ponto de vista econômico. Para tanto, inicia-se com uma descrição do ponto de vista da Teoria Econômica do problema da disposição final do lodo de esgoto.

2.1 Poluição

A poluição é considerada dentro da teoria econômica como uma externalidade negativa. Seja U_j a utilidade de um determinado agente econômico j , medida através do consumo dos m bens e/ou serviços X . A externalidade negativa existe quando o consumo de um determinado bem e/ou serviço n , por um outro agente econômico k , afeta negativamente a utilidade de j :

$$U_j = U_j(X_{1j}, X_{2j}, X_{3j}, \dots, X_{mj}, f(X_{nk})) \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial X_n} < 0 \quad (2)$$

É importante ressaltar que a externalidade só será objeto de estudo da teoria econômica quando o agente econômico j não for indiferente à X_{nk} , ou seja, quando a externalidade for considerada relevante. Na existência de possibilidade de trocas entre os agentes econômicos, de maneira a melhorar a situação de j sem piorar a situação de k , a externalidade passa a ser considerada Pareto-relevante. Nestes casos, os agentes econômicos prejudicados tentarão de alguma forma minimizar a perda de utilidade (Randall, 1987).

A minimização pode ocorrer de duas maneiras: o agente econômico que está sendo prejudicado recebe uma compensação monetária do agente econômico que está causando a externalidade, ou então paga um determinado valor para que o causador da externalidade diminua a sua atividade. A alternativa a ser adotada depende de quem detém os direitos de propriedade sobre o bem.

O lançamento de esgotos domésticos ou industriais *in natura* nos rios, lagos e mares pode ser visto como uma externalidade negativa causada pelos moradores das cidades e/ou indústrias sobre os usuários destes recursos hídricos. Estes lançamentos ocorrem porque, em muitos casos, existe a atenuação dos direitos de propriedade sobre os recursos hídricos. E, em função disto, os agentes econômicos passam a utilizar estes recursos além do que seria ótimo, do ponto de vista social (Randall, 1987; Tietenberg, 1988).

A atenuação dos direitos de propriedade pode ocorrer devido a:

- “não exclusividade” sobre o bem e/ou serviço - ocorre quando não é possível excluir ninguém da utilização do bem e/ou serviço. Vários são os fatores que levam a “não exclusividade”, entre eles, aspectos culturais e políticos e as próprias características do bem e/ou serviço; e
- “não rivalidade” no consumo - ocorre quando o consumo do bem e/ou serviço por um agente econômico não reduz a quantidade do bem e/ou serviço para os demais

agentes econômicos. A “não rivalidade” no consumo ocorre devido às características do bem e/ou serviço.

A fim de corrigir estas falhas é preciso impor sobre o bem e/ou serviço direitos de propriedade não atenuados. Direitos de propriedade não atenuados são aqueles que são completamente especificados, exclusivos, transferíveis e possíveis de serem impostos (Randall, 1987).

Na falta de direitos de propriedade não atenuados, os governos procuram investir em esgotamento sanitário, além de criar leis ambientais que impedem o lançamento *in natura* dos esgotos nos corpos d’água, procurando minimizar e até mesmo eliminar este tipo de externalidade. Com isto, busca-se aumentar a utilidade dos usuários dos recursos hídricos; proteger a saúde da população contra epidemias e manter a sustentabilidade ecológica do meio ambiente.

Os benefícios e custos do esgotamento sanitário são de difícil mensuração e fogem do escopo deste estudo. Não será levado em consideração neste estudo se existe ou não a viabilidade econômica do esgotamento sanitário para a região em questão. O que se pretende é propor metodologias de avaliação das alternativas de disposição final do LE. Havendo o esgotamento sanitário, avalia-se do ponto de vista social, qual a melhor forma de se dispor o resíduo decorrente deste esgotamento.

2.2 Análise benefício-custo

Para estudar qual a melhor alternativa de disposição final do LE, sugere-se a avaliação social de projetos, através da aplicação de Análise de Benefício-Custo (ABC). Através desta metodologia pretende-se selecionar quais seriam as alternativas ótimas, do ponto de vista social. Para tanto, seria necessário utilizar preços de mercado sem subsídios e outras distorções, tais como externalidades (Seroa da Motta, 1998).

A aplicação de tal metodologia (ABC) envolve uma série de dificuldades metodológicas a saber: identificação, mensuração e distribuição de todos os benefícios e custos (Randall, 1987). Segundo Contador (1988), além das dificuldades metodológicas citadas acima, existe uma má compreensão do que vem a ser avaliação social; o seu campo de aplicação não é bem definido e existem dificuldades quanto à natureza dos bens e serviços.

Os bens e serviços podem ser classificados em bens de mercado, públicos e semi-públicos. Os bens de mercado são aqueles cujas utilidades podem ser facilmente mensuradas através dos preços de mercado. Os bens públicos por sua vez são aqueles que têm os direitos de propriedade atenuados, ou seja, são “não exclusivos” e/ou “não rivais”. Por fim, os bens semi-públicos apresentam características dos bens de mercado e dos bens públicos (Contador, 1988).

Uma outra classificação quanto à natureza dos bens e serviços é dada por Randall (1987). Segundo este autor, os bens podem ser classificados em rivais e exclusivos; rivais e não exclusivos; não rivais e exclusivos e em não rivais e não exclusivos. Esta classificação permite um melhor entendimento sobre as características dos bens e, consequentemente, irá delimitar o campo de atuação da ABC.

São vários os instrumentos que podem ser utilizados para ABC (Noronha, 1987; Randall, 1987; Contador, 1988). O principais instrumentos são listados a seguir.

2.2.1 Período de recuperação do capital - Payback

Trata-se do número de anos necessários para que haja a recuperação do capital inicialmente investido. Este instrumento é bastante simples e de cálculo imediato. Uma das outras vantagens da utilização deste instrumento é que ele fornece resultados aproximados da liquidez e da segurança dos projetos. Quanto menor o payback, maior a li-

quidez e menor o risco envolvido (Contador, 1988). As suas falhas são várias (Noronha, 1987 e Contador, 1988):

- a. não considera o valor/custo dos recursos ao longo do tempo, ou seja, não atualiza os fluxos futuros. Além do mais, ele não leva em consideração os fluxos previstos após o período de payback;
- b. não define qual o valor mínimo do payback exigido para a aceitação de projetos;
- c. não é uma medida de lucratividade do investimento; e,
- d. ignora os problemas de escala, pelo fato de ser apenas uma relação entre valores.

Ceteris paribus, o melhor projeto é aquele que possui o menor payback. Bussey, citado por Noronha (1987), define o payback como sendo o número mínimo de anos (n), necessários para que a seguinte igualdade se torne verdadeira:

$$\sum_{t=0}^n L_t = 0 \quad (3)$$

onde:

L_0 é o investimento inicial

L_t é o fluxo anual do projeto, excluída a depreciação

$t = 0, 1, 2, \dots, N$ onde $N \geq n$

2.2.2 Valor presente líquido - VPL

Corresponde à soma algébrica dos valores do fluxo de um projeto, atualizados pela(s) taxa(s) de desconto adequada(s). Trata-se portanto de um instrumento mais adequado e rigoroso. São escolhidos os projetos que apresentarem um VPL positivo, e entre eles, aquele com o maior VPL.

Segundo Randall (1987):

$$VPL = \sum_{t=0}^T \frac{b_t - c_t}{(1+r)^t} \quad (4)$$

onde:

b_t são os benefícios do ano t ;

c_t são os custos do ano t ;

T é o último ano de vida útil do projeto;

r é a taxa de desconto

Pode-se demonstrar que quanto maior a taxa de desconto, menor o VPL, e este decréscimo ocorre a uma taxa crescente:

$$\frac{dVPL}{dr} < 0, \frac{d^2VPL}{dr^2} > 0 \quad (5)$$

Graficamente:

Gráfico 1 - Variação no VPL em função da taxa de desconto.

2.2.3 Taxa interna de retorno - TIR

A taxa interna de retorno é o valor da taxa de desconto (ρ) que faz com que VPL seja igual a zero, ou seja, é a taxa de desconto que iguala o valor presente dos benefícios de um projeto ao valor presente dos seus custos. Todos os projetos que tiverem $\rho > r$ são viáveis. O escolhido é aquele que tiver o maior ρ .

Utilizando a notação de Randall (1987), tem-se:

$$0 = \sum_{t=0}^T \frac{b_t - c_t}{(1 + \rho)^t} \quad (6)$$

Graficamente, a TIR é determinada no ponto **B** onde a curva de VPL corta o eixo horizontal (Gráfico 1). É possível a existência de múltiplas TIR (Teorema de Sinais de Descartes), uma vez que o polinômio de grau T que representa a função do VPL pode ter mais de uma raiz real, e por definição, cada raiz deste polinômio é uma TIR. Portanto, a curva do VPL pode cortar o eixo horizontal em mais de um ponto.

Existem várias restrições à utilização da TIR (Contador, 1988), entre elas:

1. A TIR pressupõe que a taxa de desconto seja constante ao longo do tempo, uma condição difícil de ocorrer no mundo real. Quando a taxa de desconto varia ao longo do tempo, a TIR pode conduzir a decisões erradas, uma vez que a TIR é uma média no tempo, e não faz sentido comparar uma média com uma taxa de desconto referente a apenas um dos períodos de vida do projeto;
2. Como alertado anteriormente, podem ocorrer raízes múltiplas. O conceito da TIR só teria sentido se todas as raízes fossem iguais, reais e positivas, porém isto nem sempre acontece. Nos projetos classificados como “não convencionais” ou “mal comportados”, podem ocorrer raízes imaginárias, positivas e negativas, porém isto não signi-

fica necessariamente que o projeto deva ser descartado, apenas mostra que a TIR não é um bom critério a ser aplicados nestes casos.

2.2.4 Relação benefício custo - B/C

Apesar de apresentar inúmeros problemas, a relação Benefício-Custo é um dos instrumentos mais utilizados na análise de projetos (Contador, 1988). Este instrumento nada mais é do que a razão entre o valor presente dos benefícios e o valor presente dos custos. Todos projetos que possuem $\frac{B}{C} \geq 1$ são viáveis. Aquele que possuir a maior relação benefício custo é escolhido.

Novamente, utilizando a notação de Randall (1987) tem-se:

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^T b_t / (1+r)^t}{\sum_{t=0}^T c_t / (1+r)^t} \quad (7)$$

sendo:

b_t são os benefícios do ano t ;

c_t são os custos do ano t ;

T é o último ano de vida útil do projeto;

r é a taxa de desconto

2.2.5 Seleção de projetos

Todos os instrumentos descritos acima possuem suas vantagens e desvantagens.

A escolha de um deles para selecionar um determinado projeto deve levar em consideração as características do projeto e o tipo de informação disponível. Alguns dos pontos importantes que devem ser levados em consideração, segundo Contador (1988), são: a interdependência entre projetos, o racionamento de capital, a vida útil de cada projeto e o “timing”, ou seja, qual a melhor época para se iniciar o projeto.

Randall (1987) por sua vez salienta os seguintes pontos como importantes para a ABC de um projeto: horizonte temporal, valor residual, mudanças tecnológicas e categorias em que se enquadram os bens e/ou serviços (valor de uso, opção e existência²).

Entre os inúmeros problemas da ABC, talvez o principal seja a dificuldade em identificar e mensurar todos os benefícios e custos. Segundo Hufschmidt (1983) os custos totais devem abranger os custos de oportunidade, manutenção, operação, reposição e as externalidades negativas. Já, os benefícios totais devem abranger os benefícios internos, externos, secundários e as externalidades positivas.

Algumas considerações devem ser feitas, em especial sobre a relação entre VPL e TIR. O Gráfico 2 apresenta os VPLs e TIR de dois projetos hipotéticos A e B. Ao utilizar o critério de VPL, ambos os projetos serão aceitos para qualquer taxa de desconto menor que ρ_a . Na situação em que a taxa de desconto for menor que ρ_f , o projeto A é preferível ao projeto B. Porém, na situação em que a taxa de desconto estiver entre ρ_f e ρ_b , o projeto B torna-se preferível. Utilizando o critério de TIR, o projeto B é preferível

² Segundo Randall (1987), um determinado bem e/ou serviço pode possuir os seguintes valores:

- Valor de uso: valor que resulta da combinação de algumas características do bem e/ou serviço com outros fatores para a criação de utilidade/satisfação.
- Valor de opção: valor relacionado com a possibilidade de uso futuro e a disposição dos indivíduos a pagar por esse uso (potencial).
- Valor de existência: valor decorrente da extração de utilidade da informação de que determinado recurso existe, mesmo que o indivíduo não tenha expectativa de utilizá-lo.

ao A. Os dois critérios levam à mesma classificação de projetos somente se a taxa de desconto for maior que ρ_f .

Gráfico 2 - VPL e TIR de dois projetos hipotéticos, A e B.

A taxa de desconto ρ_f é conhecida como taxa de desconto de Fisher, e corresponde ao ponto de intersecção das duas curvas de VPL.

Como conclusão pode-se afirmar que os critérios que utilizam técnicas de desconto (VPL, TIR e B/C) são superiores aos que não utilizam (Payback). O Payback pode ser considerado um critério secundário, próprio para auxiliar no processo de desempate entre alternativas indiferentes, segundo outros critérios (Contador, 1988). Entre os critérios que utilizam taxa de desconto, o VPL tende a ser mais útil do que a TIR, devido aos problemas que este último critério pode vir a apresentar. Fica claro que todo projeto com VPL positivo terá sempre uma relação B/C maior que a unidade, mas o valor da relação pode ser facilmente alterado através de manipulações algébricas (Contador, 1988). Portanto, sugere-se que o critério básico seja o VPL, sendo que os demais seriam utilizados como critérios auxiliares no processo decisório, no sentido de com-

plementar as informações disponíveis.

2.3 Relação fator-produto

Uma vez definido, através da ABC, que a aplicação do LE na agricultura é a alternativa mais viável do ponto de vista econômico, torna-se necessário estudar esta alternativa de disposição do ponto de vista do agricultor. Para isto sugere-se a abordagem da relação fator-produto. De acordo com esta relação, o agricultor, só irá utilizar o LE como insumo (fator de produção) se a Produtividade Receita Marginal (*PRMa*) do fator for maior que o seu preço (P_X)³. A quantidade ótima do fator a ser utilizada é aquela em que:

$$PRMa = P_X \quad (8)$$

Uma vez que a Produtividade Receita Marginal é o incremento da receita total, quando se aumenta de uma unidade a quantidade do fator variável, ocorre:

$$PRMa = \frac{d(RT)}{dX} = \frac{d(Y \cdot P_Y)}{dX} = \frac{dY}{dX} \cdot P_Y = PFMa \cdot P_Y \quad (9)$$

onde:

RT - é a receita total;

X - fator variável;

Y - produção;

P_Y - preço do produto;

³ As notações aqui utilizadas foram retiradas de Hoffman (1989).

PFMa - Produtividade Física Marginal

Substituindo a Equação 8 na Equação 7:

$$PFMa \cdot P_y = P_x$$

$$PFMa = \frac{P_x}{P_y}$$

$$\frac{dY}{dX} = \frac{P_x}{P_y} \quad (10)$$

Neste ponto, o acréscimo de receita proveniente do uso da última unidade do fator variável é igual ao acréscimo de custo resultante do uso desta última unidade. A Equação 10 pode ser obtida através do cálculo diferencial da função de receita líquida (*RL*):

$$RL = RT - C - K = Y \cdot P_y - X \cdot P_x - K \quad (11)$$

onde:

K - custo dos fatores fixos.

Pela condição de 1ª ordem, para que a *RL* seja máxima, é necessário que:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{P_x}{P_y}$$

Esta condição é necessária, porém não suficiente para a maximização da *RL*. Para que a condição se torne suficiente, é necessário que a condição de 2ª ordem seja respeitada, ou seja:

$$\frac{d^2Y}{dX^2} < 0 \quad (12)$$

O Gráfico 3 mostra a quantidade de X que deve ser utilizada pelo agricultor para que a RL seja maximizada. Esta quantidade, corresponde no Gráfico 4, ao ponto em que $PRMa = P_x$.

Gráfico 3 - A função de receita total (RT).

Gráfico 4 - As funções de produtividade-receita média ($PRMe$) e produtividade-receita marginal ($PRMa$).

2.4 Teoria econômica para a gestão integrada de resíduos

Uma outra maneira de abordar o problema da disposição adequada do lodo de esgoto é através da gestão integrada de resíduos⁴. Por um sistema integrado de gerenciamento de resíduos sólidos entende-se um sistema que procura seguir uma determinada lista hierárquica de alternativas para a disposição (Chermont & Seroa da Motta, 1996):

- a) redução da geração de resíduos na fonte;
- b) reutilização do material produzido;
- c) reciclagem;
- d) recuperação de energia (incineração); e,
- e) aterro sanitário.

No caso específico do lodo de esgoto, as duas primeiras alternativas (redução e reutilização) dependem da tecnologia empregada para o tratamento dos esgotos, fugindo do escopo deste trabalho. Para a terceira alternativa, existe a possibilidade de se utilizar o lodo de esgoto em áreas agrícolas, florestais e degradadas, como visto anteriormente. Todas estas alternativas podem portanto, ser classificadas como reciclagem do lodo de esgoto.

Sendo assim, a gestão integrada de resíduos poderia ser utilizada para analisar os benefícios e custos das diversas alternativas de disposição, incluindo incineração e disposição em aterros sanitários. O primeiro passo seria a determinação correta dos custos e benefícios de cada uma das alternativas. No caso da reciclagem poderiam ser considerados custos: atividades de coleta, triagem e transporte. Os benefícios poderiam ser resultado dos custos privados evitados com outras formas de disposição final; custos externos evitados com outras alternativas de disposição final; e receitas de venda do material reciclado.

⁴ Este tópico está baseado em Pearce & Brisson (1995) e Chermont & Seroa da Motta (1996).

A fim de ilustrar a análise requerida para comparar as alternativas, supõe-se um modelo simples em que existe apenas uma alternativa fora da reciclagem, por ex.: disposição em aterro (Gráfico 5).

Gráfico 5 – Determinação do nível ótimo de reciclagem.

Fonte: Pearce & Brisson, 1995

O total de lodo a ser disposto é mostrado no eixo horizontal. Esta quantidade ($O\bar{W}$) já representa a quantidade ótima do ponto de vista da redução e reutilização. O eixo vertical mostra os custos e benefícios em termos monetários. A curva MSC_R , representa o custo marginal social da reciclagem⁵, ou seja, o custo da reciclagem incluindo todos os impactos ambientais, descontadas as receitas obtidas da reciclagem. A reciclagem apresenta, a princípio, receitas superiores aos custos, consequentemente a curva

⁵ Por custo marginal social entende-se o custo de toda a sociedade para a reciclagem de uma unidade adicional de resíduo.

MSC_R começa abaixo do eixo horizontal, porém no ponto R_S os custos passam a ser maiores que as receitas.

Da mesma forma podemos definir a curva MSC_L como sendo o custo marginal social de disposição em aterros. Este custo é sempre positivo, ou seja, não existem receitas decorrentes da utilização desta alternativa de disposição.

De acordo com o Gráfico 5, a quantidade ótima de resíduo que deve ser reciclada (R^*), do ponto de vista econômico, é dada pela intercessão das duas curvas de custos marginais no ponto **B**. Neste ponto os custos totais sociais da disposição (incluindo a reciclagem) são minimizados para a sociedade como um todo. Uma vez que as áreas abaixo das curvas marginais representam totais, o custo social mínimo é representado pela área $R_SBR^* + R^*BC\bar{W} - ODR_S$ (o custo da reciclagem mais o custo da disposição em aterro menos as receitas sociais da reciclagem).

É interessante observar que o nível ótimo de reciclagem para a sociedade (R^*) é superior ao nível que leva em consideração somente as receitas e custos da reciclagem (R_S). No ponto R_S ocorre a maximização das receitas advindas da reciclagem, ou seja, neste ponto as receitas marginais são iguais a zero. Da mesma forma observa-se que não é interessante para a sociedade que todo o resíduo seja reciclado, já que neste caso os custos impostos para a sociedade são muito maiores.

O Gráfico 5 também mostra que a fim de garantir o nível R^* de reciclagem deveriam ser feitos pagamentos (“créditos”) iguais a BR^* para os agentes econômicos responsáveis pela reciclagem. Este pagamento teria que ser feito já que pelo mercado, a reciclagem só irá ocorrer até R_S .

É possível decompor as curvas de custos marginais a fim de refletir sobre algumas das complexidades do mundo real. No caso da disposição em aterros, os custos poderiam ser decompostos em: custos financeiros, custos ambientais (externalidades) e de

recuperação de energia⁶. Já os custos da reciclagem poderiam ser decompostos em custos financeiros e custos ambientais.

O Gráfico 6 mostra os diferentes custos da disposição em aterros. Os custos financeiros são os custos referentes a mão-de-obra, equipamentos e aquisição de áreas (MC_L). A esta curva são adicionados os custos das externalidades (MEC_L), tais como lixiviação de contaminantes, emissão de gases, mau cheiro, barulho, etc. Porém, a emissão de gás metano trata-se de um custo negativo (MVE_L), que também permite a economia de outras fontes de energia (MDP_L).

Gráfico 6 – Curvas de custos marginais para a disposição em aterros.

Fonte: Pearce & Brisson, 1995

O Gráfico 7 por sua vez, mostra a decomposição dos custos da reciclagem. Os

⁶ Graças à queima de gás metano produzido durante a decomposição da matéria orgânica.

custos marginais financeiros⁷ (MC_R) da reciclagem são sempre positivos e as externalidades (MEC_R) aumentam os custos. Porém, as receitas recebidas das vendas do produto reciclado (P_R) diminuem os custos.

Gráfico 7 – Curvas de custos marginais para a reciclagem.

Fonte: Pearce & Brisson, 1995

Através da decomposição dos custos torna-se possível estabelecer outras formas de “pagamentos” a fim de garantir o nível ótimo de reciclagem (R^*). Uma delas seria a taxa da disposição em aterros, cujo valor seria igual ao custo marginal da externalidades dos aterros (MEC_L). O Gráfico 8 mostra como estes instrumentos econômicos

⁷ O presente estudo calculou alguns dos custos da reciclagem agrícola do lodo de esgoto, através de uma planilha de custo norte-americana. Através desta planilha será possível calcular os custos marginais financeiros (MC_R).

(crédito ou taxa) podem garantir o nível ótimo de reciclagem.

Gráfico 8 – Nível ótimo de reciclagem com utilização de crédito e taxa.

Fonte: Pearce & Brisson, 1995

No gráfico acima fica evidente que não existe recuperação de energia nos aterros, logo, o nível ótimo de reciclagem ocorre em **B**. Para garantir isto, pode-se utilizar um crédito C_R junto com uma taxa t_L . A utilização de tais instrumentos econômicos é mais eficiente do que a simples imposição de uma meta de reciclagem, pois normalmente estas metas são estabelecidas sem levar em consideração os custos sociais envolvidos. Como exemplo, pode-se observar no Gráfico 9 que ao se estabelecer uma meta de reciclagem (**T**) acima do nível ótimo de reciclagem (R^*) incorre-se em custos excessivos (**ABC**).

Gráfico 9 – Nível de reciclagem estabelecido através de metas.

Fonte: Pearce & Brisson, 1995

Quando se estabelece uma meta de reciclagem (T), superior ao nível ótimo de reciclagem (R^*) incorre-se em um custo R^*TCA . Este custo torna-se excessivo pois é superior ao custo de utilização de aterros (R^*TBA). Portanto, tem-se uma perda de ABC .

Outro instrumento econômico para o estabelecimento do nível ótimo de reciclagem são os certificados de reciclagem comercializáveis. Eles funcionariam como os certificados de emissão: os agentes econômicos poderiam realizar trocas, a fim de adequar seus níveis de reciclagem de acordo com seus custos. Um exemplo deste tipo de instrumento pode ser visto no Gráfico 10.

Gráfico 10 – Certificados de reciclagem comercializáveis.

Fonte: Pearce & Brisson, 1995

Assume-se que existem dois agentes econômicos (A e B), cujas curvas de custo marginal para reciclagem são: $MC_{R,A}$ e $MC_{R,B}$. Os níveis ótimos de reciclagem do ponto de vista do mercado, são respectivamente Y e X. Caso o governo estabeleça uma meta de reciclagem em T, o agente B terá que aumentar a reciclagem em XT, enquanto que A não terá que fazer nada. Como B tem um custo de reciclagem maior que A, ele pode pagar para A reciclar XT. Como B fosse reciclar XT isto lhe custaria XTZ; se A reciclasse XT isto lhe custaria somente YWV. Portanto os dois agentes poderiam comercializar os certificados e manter os custos, para atingir a meta T em um ponto mínimo.

Além dos dois mecanismos citados acima existem outros que podem ser utilizados, tais como: cobrança pela geração de resíduos, impostos sobre produtos, etc. No caso específico da disposição final do lodo de esgoto, alguns destes mecanismos não seriam viáveis devido às características de produção, ou seja, devido às características do saneamento básico. Porém tais mecanismos poderiam servir de inspiração para a criação de

mecanismos específicos que permitam a determinação correta dos custos sociais da disposição adequada deste material.

O presente estudo não pretende aplicar nenhuma das metodologias e/ou ferramentas descritas acima, porque infelizmente, ainda não existe no Brasil um serviço de saneamento ambiental que gere uma quantidade expressiva de lodo de esgoto (ver Capítulo 3). Consequentemente não há informações suficientes a respeito da disposição do lodo de esgoto, que permitam a aplicação de tais metodologias e/ou ferramentas. Neste estudo será abordada uma metodologia para a determinação dos custos privados da disposição agrícola (Capítulo 7).

3 A SITUAÇÃO DO SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL E NA REGIÃO DE ESTUDO

Desde os primórdios o homem vem procurando eliminar os dejetos provenientes de suas atividades sócio-econômicas. Uma de suas principais preocupações tem sido o afastamento das águas residuárias dos centros populacionais. Uma das maneiras por ele encontrada foi o lançamento dos esgotos brutos nos diferentes corpos d'água (rios, lagos e mares) e/ou nos solos. Dependendo das circunstâncias, a natureza tem condições de promover o “tratamento” desta carga poluidora, através da evolução, reprodução e crescimento de microorganismos que decompõem a matéria orgânica. Porém, com o advento da urbanização e do crescimento populacional, este lançamento *in natura* se torna problemático tanto do ponto de vista ambiental, como do ponto de vista econômico.

Campos (1994, p.7) salienta que cada ser humano produz cerca de 50 a 60 g de DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxigênio⁸) por dia, ou seja, “cada pessoa, através de seus esgotos, provoca um consumo de oxigênio no corpo receptor da ordem de 50 a 60 g” por dia. Assim, o lançamento indiscriminado de grandes volumes de esgoto pode causar a saturação do corpo receptor e, conseqüentemente, a sua “morte”.

⁸ Demanda Bioquímica de Oxigênio é um parâmetro que indica a quantidade de oxigênio dissolvido na água residuária e utilizada pelos microorganismos na oxidação bioquímica da matéria orgânica. (SOUZA, A. M. P. de, 1996, In.: Secretaria do Meio Ambiente . São Paulo. Estabelecimento de metas ambientais e reenquadramento dos corpos d'água: Bacia do Rio Piracicaba. 1994).

Já do ponto de vista econômico, Seroa da Motta et al. (1994) estimaram para o ano de 1989 o valor monetário das perdas ambientais decorrentes do lançamento de esgoto *in natura* nos rios. O valor encontrado foi da ordem de US\$ 387 milhões, a preços de 1980. Segundo os autores, as perdas ambientais podem ser consideradas como sendo a soma da produção sacrificada por morbidade e mortalidade humana causadas por doenças relacionadas à poluição hídrica doméstica, com os gastos médicos necessários para tratar estas doenças. O valor estimado não inclui o decréscimo no nível de utilidade dos agentes econômicos causado pela poluição hídrica, sendo, portanto, uma estimativa incompleta.

A fim de minimizar os impactos ambientais e econômicos do lançamento *in natura* dos esgotos, foram desenvolvidos diversos tipos de tratamento de esgotos. Basicamente, estes tratamentos exploram os microorganismos que se proliferam naturalmente no solo e na água, procurando no entanto, otimizar a eficiência e minimizar os custos. Entre os diversos tratamentos utilizados, os seguintes merecem destaque (FIBGE – Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1992):

- **lagoa de estabilização:** tipo de tratamento de esgoto que utiliza um processo natural e/ou artificial. Consiste-se basicamente de lagos de pouca profundidade onde são lançados os efluentes que, através de processo aeróbio e anaeróbio, são oxidados. O esgoto infiltra no terreno ou evapora. Necessita de grandes áreas com topografia adequada, o que torna sua utilização inviável, dependendo da região e do volume de esgoto a ser tratado;
- **lagoa aerada:** tipo de tratamento de esgoto que utiliza lagoa com aeração mecânica para suprir o oxigênio necessário para a digestão do esgoto. Apresenta os mesmos problemas do tratamento anterior, porém sua eficiência é maior;

- **valo de oxidação:** reator biológico aeróbio que pode ser utilizado para qualquer tipo de processo de lodo ativado. Este sistema é vantajoso porque necessita de pouca área e é mais eficiente no tratamento de esgoto. O custo muito elevado de construção é uma de suas desvantagens;
- **unidade de tratamento preliminar:** conjunto de instalações e equipamentos, composto apenas de grade e caixa de areia. Recomendado para o tratamento de pequenos volumes, pois sua eficiência é baixa. Apresenta como vantagem um baixo custo de construção;
- **unidade de tratamento primário:** conjunto de instalações e equipamentos, composto de grade, caixa de areia, decantador e secagem do lodo. Uma variante do modelo anterior, em que a eficiência e o custo de construção são um pouco mais elevados; e,
- **unidade de tratamento de esgoto (ETE):** é o conjunto de instalações e equipamentos destinados a realizar o tratamento de esgoto sanitário, compondo-se basicamente de grades, caixa de areia, decantador primário, lodos ativados e/ou filtro biológico, decantador secundário e secagem do lodo proveniente dos decantadores (Figura 2). Normalmente requer pouca área, apresenta custos relativamente altos de construção e possui índices de eficiência elevados.

Figura 2 - Fluxograma de uma estação de tratamento de esgoto (ETE).

Fonte: Bettiol et al., 1983

Um outro tipo de tratamento que merece destaque é o **RALF** (Reator Anaeróbico de Lodo Fluidizado), bastante utilizado no Paraná. Este sistema de tratamento apresenta eficiência média de 70% e tem baixo custo de implantação e operação (SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná, 1997).

Basicamente, os tratamentos diferem entre si em função do nível tecnológico empregado e da eficiência de remoção da carga poluidora⁹. Porém existe um ponto em comum entre todos os tratamentos: a geração de um resíduo sólido, representado pela

⁹ Uma descrição mais detalhada dos principais tipos de tratamento pode ser obtida em Metcalf & Eddy, (1991).

proliferação dos microorganismos que promovem a digestão do esgoto. Este resíduo é geralmente chamado de **lodo de esgoto (LE)**.

É interessante mencionar que para um mesmo efluente o processo anaeróbico gera um volume de lodo 20% menor do que o processo aeróbico (Campos, 1994). Além disto, conforme o tipo de tratamento empregado, são produzidos diversos tipos de lodos em diferentes intervalos de tempo. O próximo capítulo apresenta uma descrição mais detalhada do que vem a ser o lodo de esgoto.

3.1 A situação do saneamento básico no Brasil

Em 1989 o IBGE realizou a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (Tabelas 1 a 4) e constatou que eram coletados cerca de 10.667.823 m³ de esgoto por dia. Deste montante, mais de 80% (cerca de 8,5 milhões de m³) não passavam por nenhum tipo de tratamento (ISPN – Instituto Sociedade, População e Natureza, 1995). Portanto, a maior parte do esgoto produzido pela população brasileira vinha sendo despejada *in natura* nos rios e lagos ou diretamente no solo, comprometendo a qualidade da água para outros fins, tais como o abastecimento público, irrigação ou recreação, além de trazer riscos para a saúde da população (Santos, 1993).

Além dos índices relativamente baixos de tratamento, O IBGE também constatou que no Brasil ocorriam grandes disparidades regionais na coleta de esgoto (Tabela 1). Em 1989, apenas 28% dos domicílios brasileiros eram atendidos por uma rede de coleta de esgoto. Nas regiões Norte e Nordeste, o serviço de esgotamento sanitário atingia proporções insignificantes (3 e 7%, respectivamente). Mesmo nas regiões onde o serviço era mais abrangente (Região Sudeste, com 46% dos domicílios ligados à rede geral de esgoto), a situação não era a mais adequada.

Tabela 1 - Proporção de domicílios com coleta de esgoto, por grandes regiões, segundo os extratos populacionais dos municípios, Brasil, 1989 (em %).

População Municípios	Proporção de domicílios com coleta de esgoto (%)					
	Brasil	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	C. Oeste
Total	28	3	7	46	22	24
Até 20.000	15	-	2	40	7	1
20.001 - 45.000	16	2	3	40	15	5
45.001 - 100.000	25	2	5	50	16	12
100.001 - 300.000	35	3	14	47	31	9
300.000 e mais	40	8	16	47	45	56

Fonte: ISPN, 1995

Através dos valores apresentados pode-se observar que a pequena porcentagem dos domicílios brasileiros que possuía coleta de esgoto (28%), estava concentrada em regiões específicas (Sul, Sudeste e Centro-Oeste), especialmente em municípios com alta concentração populacional (acima de 100.001 habitantes). Esta disparidade pode ser explicada em função da desigualdade econômica e social existente entre regiões e entre municípios. A única região que apresentava índices mais homogêneos era a região Sudeste, que pode ser considerada uma das regiões mais desenvolvidas do país.

Em relação ao tipo de tratamento também existiam disparidades (Tabelas 2 e 3). Nota-se uma variação bastante acentuada na quantidade de municípios em função do tipo de tratamento. Esta variação pode ser explicada em função de uma série de fatores, entre eles: tamanho dos municípios, disponibilidade de área e de recursos financeiros, volume e qualidade do esgoto a ser tratado, qualificação técnica dos recursos humanos disponíveis, etc.

Tabela 2 - Número de municípios com coleta e tratamento de esgoto, por tipo de tratamento, segundo as grandes regiões, Brasil, 1989.

Regiões	Municípios com coleta	Tipo de tratamento							
		Total	ETE	Unidade de tratamento preliminar	Unidade de tratamento primário	Lagoa de estabilização	Lagoa aerada	Valo de oxidação	Outro
Norte	25	7	2	1	1	3	3	1	2
Nordeste	381	53	5	3	5	44	5	6	6
Sudeste	1.301	214	25	10	11	129	4	8	49
Sul	335	57	16	3	7	18	1	2	18
Centro Oeste	49	14	3	-	1	11	3	1	1
Brasil	2.091	345	51	17	25	205	16	18	76

Fonte: FIBGE, 1992

A Tabela 3 mostra a quantidade de esgoto coletada e tratada diariamente em 1989, baseando-se nos dados dos municípios da Tabela 2. Os dados daquela tabela mostram que nas regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste a maior parte do tratamento era feito através de ETE (respectivamente 45, 48 e 64% do esgoto tratado). Já as regiões Norte e Nordeste utilizavam lagoas de estabilização e lagoas aeradas (respectivamente 54 e 64% do esgoto tratado). Estes números não surpreendem, dados os altos custos de construção e operação das ETEs, indicadas para grandes volumes de esgoto, comparativamente às lagoas de estabilização e lagoas aeradas, que necessitam de maiores áreas e têm maior eficiência para volumes menores de esgoto. O Brasil como um todo tratava seu esgoto na seguinte proporção: 44% ETE, 9% unidade de tratamento preliminar, 1% unidade de tratamento primário, 20% lagoa de estabilização, 2% lagoas aeradas, 2% valo de oxidação e 22% outros tratamentos.

Tabela 3 - Volume de esgoto coletado e tratado por dia, por tipo de tratamento, segundo as grandes regiões, Brasil, 1989.

Regiões	Volume total de esgoto coletado por dia (m ³)	Volume de esgoto tratado por dia (m ³)							
		Tipo de tratamento							
		Total	ETE	Unidade de tratamento preliminar	Unidade de tratamento primário	Lagoa de estabilização	Lagoa aerada	Valo de oxidação	Outro
Norte	91.182	13.822	1.944	334	2.250	4.384	3.075	20	1.815
Nordeste	1.076.722	178.178	8.447	35.094	1.252	96.455	17.573	15.575	3.782
Sudeste	7.836.324	1.521.092	691.778	140.051	17.193	218.298	12.616	30.252	410.904
Sul	1.038.679	281.890	135.759	20.473	4.565	65.742	1.600	895	52.856
Centro Oeste	624.916	129.943	83.374	-	85	35.508	10.150	346	480
Brasil	10.667.823	2.124.925	921.302	195.952	25.345	420.387	45.014	47.088	469.837

Fonte: FIBGE, 1992

Finalmente, a Tabela 4 apresenta a porcentagem do esgoto coletado que recebia algum tipo de tratamento. Nota-se que apenas uma pequena porcentagem (19,9% no Brasil como um todo) recebia algum tipo de tratamento. Isto significa que o restante foi “afastado” das cidades, ou seja, lançado diretamente nos corpos receptores, causando importantes impactos ambientais e econômicos.

Tabela 4 - Volume diário de esgoto coletado nas grandes regiões e esgoto coletado que recebe tratamento, Brasil, 1989.

Regiões	Esgoto coletado (m ³)	% do esgoto coletado com tratamento
Brasil	10.667.823	19,9
Norte	91.182	15,2
Nordeste	1.076.722	16,5
Sudeste	7.836.324	19,4
Sul	1.038.679	27,1
Centro Oeste	624.916	20,8

Fonte: ISPN, 1995

Atualmente, estima-se que no Brasil os cursos d'água recebam diariamente, 2000 t de lodos de decantadores (Fernandes, 1997). Esta estimativa é feita com base na produ-

ção média de lodo, para os sistemas aerados, de 17,5 kg/ano em base seca por equivalente habitante.

3.2 A situação do saneamento básico na região de estudo

A região de estudo apresenta também, uma crescente degradação de seus recursos hídricos (Figura 3). Essa degradação é decorrente, além de outros fatores, do lançamento de efluentes domésticos e industriais sem tratamento nos cursos d'água. Estes efluentes possuem uma carga poluidora potencial estimada em cerca de 1.150 toneladas de DBO₅/dia (PROJECTUS, 1997).

A carga poluidora dos rios da região de estudo é apresentada em função das vazões coletadas e tratadas, assim como em função da carga orgânica coletada e tratada (Tabela 5), a qual por sua vez é medida em função da Demanda Bioquímica de Oxigênio. Os valores apresentados são bastante alarmantes: apenas 2,5% da vazão coletada recebe algum tratamento, e a carga orgânica tem apenas 2,9% de seu volume coletado. A eficiência do tratamento por sua vez é elevada (78,4% da carga orgânica é removida). Porém, devido ao pequeno volume tratado, as descargas são elevadas, contribuindo bastante para a degradação dos rios em questão.

Figura 1 - Mapa da área de atuação do Comitê das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí.

Fonte: CBH-PCJ, 1996

Tabela 5 - Informações selecionadas sobre o esgotamento sanitário nas várias bacias e sub-bacias objetos do estudo, 1993.

Bacias/ Sub-bacias	Vazão média m ³ /s		Carga orgânica t/DBO/dia		Carga remo- vida t/DBO/dia ^b	Descargas	
	Coletada	Tra- tada	Coletada	Tratada ^a		m ³ /s	t/DBO/dia
Atibaia	0,84	0,01	23,99	0,27	0,22	0,84	23,77
Corumbataí	0,38	0,03	9,81	0,80	0,61	0,38	9,20
Jaguari	0,38	0,05	12,35	1,39	1,10	0,38	11,25
Piracicaba	1,88	0,05	52,66	1,56	1,23	1,88	51,43
Capivari	1,00	0,00	23,10	0,09	0,06	1,00	23,04
Jundiaí	1,08	0,00	26,06	0,14	0,11	1,08	25,95
Piracicaba/ Capivari/ Jundiaí	5,56	0,14	147,97	4,25	3,33	5,56	144,64

Fonte: PROJECTUS, 1997

a. Carga afluyente à ETE.

b. Parcela da carga retida no processo de tratamento.

Em 1993, 78% da população urbana total desta região era atendidas por sistema de coleta (Tabela 6). Os índices mais altos de atendimento encontravam-se na sub-bacia do Corumbataí (97%) e os mais baixos, na sub-bacia do Atibaia (71%).

Tabela 6 – População atendida por sistemas de esgotamento sanitário, bacia do Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 1993.

Bacia	População 1993		Índice de aten- dimento ^a (%)	Número de ligações
	Urbana	Atendida ⁽¹⁾		
Piracicaba/ Capivari/ Jundiaí	3.489.490	274.0284	78	711.490

Fonte: PROJECTUS, 1997

a. Atendimento por rede coletora, ou seja, por coletores específicos para o esgoto.

Para exemplificar a situação da região podemos citar o caso da cidade de Campinas. Considerada o maior núcleo urbano da região, ela trata apenas 6,5% do volume total de esgoto coletado (cuja vazão é de $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$), apesar de possuir 15 estações de tratamento primário. O restante é lançado nos córregos das sub-bacias do rio Atibaia (36%), do rio Quilombo (11%) e do rio Capivari (53%). Caso não sejam tomadas medidas cabíveis, o déficit na área de tratamento de esgotos tende a se acentuar. Segundo estudos realizados pela SANASA (1994), citado por PROJECTUS (1997), a cidade de Campinas terá que utilizar, no ano de 2020, um sistema de tratamento de esgotos dimensionado para uma vazão média final de $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

As demais cidades da região, como Piracicaba, Limeira, Americana, Jundiaí, Santa Bárbara d'Oeste e Rio Claro encontram-se em situação pior, uma vez que não possuem estações de tratamento de esgotos em número suficiente e com capacidade de tratamento adequada (PROJECTUS, 1997).

Portanto, a situação da região é bastante precária, refletindo as condições de saneamento básico em que se encontra o país. Para que a qualidade dos recursos hídricos e a saúde da população atinjam patamares mais elevados, tornam-se necessários investimentos na coleta e no tratamento do esgoto, investimentos que já estão em andamento, como será visto a seguir.

3.3 Investimentos em saneamento básico

3.3.1 Investimentos nacionais

O Brasil conseguiu, nas últimas duas décadas, avanços importantes na prestação de serviços de esgotamento sanitário (ISPN, 1995). Porém, este setor ainda convive com sérias dificuldades institucionais, financeiras e operacionais. Isto decorre da inexistência

de uma política pública para o setor e da falência do modelo de financiamento anteriormente adotado (Ministério do Planejamento e Orçamento, 1996).

Diante deste panorama, o governo federal pretende reforçar os “investimentos em infra-estrutura urbana, especialmente os voltados ao saneamento ambiental, que são essenciais, também, para a redução das desigualdades sociais” (Ministério do Planejamento e Orçamento, 1996, p.85). Estima-se, segundo esse documento, que serão realizadas ampliações significativas tanto no sistema de abastecimento de água (alterando-se o nível de atendimento de 86% para 100%), quanto na coleta de esgotos (passando o nível de atendimento de 64% para 80%), e no seu tratamento (pretende-se chegar a 40% do volume coletado). O volume total destes investimentos, para o país como um todo, está orçado em R\$ 1.637,2 milhões. Somente no ano de 1996, foram realizadas obras no montante de R\$ 1.374,3 milhões, valor que representa 83,9% do programado (SEPLAN –Secretaria de Planejamento, Orçamento e Coordenação, 1997).

3.3.2 Investimentos municipais

A Secretaria Executiva do Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (CBH-PCJ) aponta o Plano Integrado de Aproveitamento e Controle dos Recursos Hídricos das Bacias do Alto Tietê, Piracicaba/Capivari/Jundiaí e Baixada Santista (HIDROPLAN) como “elemento básico para a formulação do plano de investimentos para solicitação de recursos financeiros externos (Banco Mundial), bem como para o detalhamento do Plano de Bacias 96/99” (PROJECTUS, 1997, p.i).

O HIDROPLAN desenvolveu planos para o esgotamento sanitário visando as seguintes metas para a bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí:

- a. atendimento médio de 92% da população urbana com coleta de esgoto em 2005, mantendo esse percentual até 2020;
- b. tratamento de 90% da vazão coletada em 2005, alcançando 100% em 2010, mantendo este percentual até 2020;
- c. obtenção de um índice médio de remoção das cargas poluidoras de 75% em 2005, crescendo para 90% em 2010 e prosseguindo com essa porcentagem até o ano 2020.

Espera-se que em 2020, 5,6 milhões de habitantes sejam atendidos pelos sistemas de esgotamento. A carga total coletada será de aproximadamente 304 t DBO/dia que, se for submetida a tratamento com eficiência média de 90%, será reduzida para o valor de 30 t DBO/dia (PROJECTUS, 1997). Em termos de volume, estima-se que em 2020, serão tratados cerca de 17.284 l/s de esgoto¹⁰.

Consequentemente, a quantidade de lodo de esgoto gerada irá aumentar, e uma disposição adequada deste material terá que ser feita. Esta disposição deve levar em consideração as características físico-químicas do lodo, assim como também os possíveis contaminantes (químicos e/ou biológicos) existentes. Portanto, a fim de determinar quais são as alternativas viáveis e seguras para a disposição final do lodo de esgoto gerado na região, torna-se necessário em primeiro lugar, conhecer suas características físico-químicas e seus possíveis contaminantes.

¹⁰ As projeções das vazões e cargas poluidoras afluentes às ETEs, separadas por municípios, podem ser vistas no Anexo A.

O próximo capítulo mostra quais são as características do lodo de esgoto que devem ser estudadas e os valores que são normalmente são observados, assim como também os principais contaminantes que podem ser encontrados e quais são os limites que alguns países impõem para a utilização do lodo de esgoto na agricultura e/ou florestas.

4 LODO DE ESGOTO¹¹

“Lodo de esgoto (LE) é uma denominação genérica para o resíduo sólido gerado pelos sistemas de tratamento de águas residuárias” (SANEPAR, 1997, p.15). Trata-se de um material heterogêneo, cuja composição depende do tipo de tratamento empregado para purificar o esgoto e das características das fontes geradoras (população e indústrias).

Conforme o que foi descrito no capítulo anterior, espera-se que haja um aumento substancial na produção de lodo de esgoto nos próximos anos, em decorrência do crescimento dos índices de tratamento dos esgotos. Segundo Santos et al. (1997), a produção de “biosólidos” da SABESP, na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), passará de 100 toneladas/dia (base seca) para 566 toneladas/dia em 2005 e 784 toneladas/dia em 2015. Segundo este mesmo autor, o volume de LE produzido na RMSP corresponde a 93% do total produzido no estado, sendo que o interior e o litoral contribuem com 5 e 2%, respectivamente.

¹¹ Nos Estados Unidos um termo que vem sendo empregado para designar o lodo de esgoto, em especial quando o objetivo é a utilização deste material como adubo na agricultura e/ou nas florestas, é “biosólido” (do inglês “biosolid”).

Entre os diversos tipos de LE que serão produzidos, merece destaque o lodo das ETEs (ver Figura 2, pag. 32). Geralmente, este tipo de tratamento é o que mais produz lodo. As características físico-químicas desse material serão apresentadas a seguir. O ideal seria que cada ETE tivesse a análise do seu lodo, devido à heterogeneidade que este material apresenta. Durante a descrição das características do material será mostrado também como estas características interferem e interagem com os solos brasileiros.

4.1 Características físico-químicas do LE¹²

De uma maneira geral, o LE pode ser caracterizado como um material bastante rico em matéria orgânica, com alto teor de umidade e com concentração relativamente elevada de nitrogênio e outros minerais. A revisão da literatura internacional mostra inúmeros trabalhos que caracterizam o LE quanto à sua composição físico-química. Na Tabela 7 pode-se observar a composição química típica do lodo não tratado, do lodo digerido e do lodo ativado¹³.

Tabela 7 - Composição típica de lodo não tratado, digerido e ativado^a.

Item	Lodo não tratado		Lodo Digerido		Lodo Ativado
	faixa	valor típico	faixa	valor típico	faixa
Mat. Seca Total (% MS) ^b	2,0-8,0	5,0	6,0-12,0	10,0	0,8-1,2
Proteína (% MS)	20,0-30,0	25,0	15,0-20,0	18,0	32,0-41,0
Nitrogênio (N % MS)	1,5-4,0	2,5	1,6-6,0	3,0	2,4-5,0
Fósforo (P ₂ O ₅ % MS)	0,8-2,8	1,6	1,5-4,0	2,5	2,8-11,0
Potássio (K ₂ O % MS)	0,0-1,0	0,4	0,0-3,0	1,0	0,5-0,7
Celulose (% MS)	8,0-15,0	10,0	8,0-15,0	10,0	-
pH	5,0-8,0	6,0	6,5-7,5	7,0	6,5-8,0

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy, 1991

a. Para uma descrição mais detalhada sobre os diversos tipos de lodo ver Metcalf & Eddy, 1991.

b. MS - Matéria Seca.

¹² Este tópico está baseado em Shiota & Rocha (1997).

¹³ **Lodo não tratado:** lodo proveniente da caixa de areia. **Lodo Digerido:** lodo proveniente do digestor secundário. **Lodo Ativado:** lodo proveniente do decantador secundário (ver Figura 2, pag. 32).

De início, é interessante observar que os teores de macro-elementos nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) são relativamente baixos se comparados com os fertilizantes químicos comumente utilizados na agricultura¹⁴. Por outro lado, esses valores são compatíveis com os teores de macronutrientes comumente encontrados nos adubos e resíduos orgânicos aplicados em solos agrícolas. Além dos macronutrientes, o LE pode apresentar outros minerais (que podem ou não ser nutrientes para as plantas).

Uma outra característica interessante do LE, é a matéria orgânica. Ela desempenha um importante e complexo papel na dinâmica dos solos, afetando suas características físicas, químicas, físico-químicas e biológicas. Sabidamente, os solos tropicais e subtropicais do Brasil são, em geral, pobres em matéria orgânica.

Quanto ao pH, o LE pode ser considerado praticamente neutro (valores em torno de 6 ~ 7). Para as condições brasileiras, em geral de solos ácidos, essa é mais uma característica interessante do LE.

A Tabela 8 apresenta algumas propriedades físicas relevantes do lodo de esgoto ativado e do lodo digerido. Pode-se verificar que, quando bem conduzido, o tratamento de esgoto produz um lodo que não apresenta características desagradáveis, seja de aspecto ou de odor. Como será visto mais adiante, essa é uma variável muito importante na escolha da disposição final do LE.

¹⁴ Por exemplo, no lodo digerido os valores típicos resultam numa formulação N-P-K próxima de 3-2,5-1, enquanto que num fertilizante comumente utilizado na agricultura esses valores são 4-14-8.

Tabela 8 - Propriedades físicas típicas do lodo ativado e digerido.

Lodo	Cor	Outras propriedades físicas	Odor	Digestibilidade
Ativado	marrom, preto se estiver séptico	floculável	inodoro, de terra, quando fres- co putrefação rápida	prontamente digerível
Digerido	escuro marrom a preto	contem gde. quantidade de gás	inodoro se totalmente digerido	bem estabilizado

Fonte: Adaptado de Polprasert, 1989

A literatura brasileira é ainda bastante limitada no que se refere a dados de composição do LE no Brasil. A Tabela 9 apresenta alguns deles. As análises mostram que os teores dos diferentes parâmetros variam bastante, mas alguns dos parâmetros (pH, N, P e K), encontram-se em níveis próximos das concentrações apresentadas na Tabela 7.

Tabela 9 - Características físico-químicas do LE segundo autores nacionais.

Fonte	pH	C/N	Mat. Orgânica	H ₂ O	cinzas	C %	N	P	K	Ca	Mg
Fernandes et al., 1993 (Lodo fresco)	6,2	7	-	98-99	10,0-12,0	33,3	4,5-5,0	3,10	0,12	1,00	0,32
Fernandes et al., 1993 (Lodo digerido)	7,0	7	-	90-91	38,0-40,0	23,5	3,0-3,2	5,60	0,20	1,86	0,33
Fernandes et al., 1993 (Lodo ativado)	7,0	5	-	98-99	12,0-13,0	30,4	6,0-6,5	2,90	0,09	0,85	0,38
Berton et al., 1989	-	11	-	-	-	15,7	1,38	0,86	0,22	1,57	0,62
Carvalho, 1982	-	-	31,74	-	-	-	1,26	2,60	0,31	-	-
Bettiol et al., 1983	6,0	-	58,68	-	-	-	2,24	4,00	0,73	-	-

OBS: (-) valor não determinado pelo estudo.

Estudos mais recentes realizados no estado do Paraná, a partir de 1993, caracterizaram o LE a fim de viabilizar a sua utilização na agricultura¹⁵. Segundo SANEPAR (1997), são produzidos no estado do Paraná basicamente dois tipos de LE: lodo anaeróbico proveniente dos reatores tipo RALF e lodo aeróbico resultante do processo de aeração prolongada da ETE-BELÉM (Curitiba). A Tabela 10 mostra a composição química destes dois tipos de LE. A composição do LE proveniente do RALF “pode apresentar grandes variações, pois estes reatores são descarregados por bateladas, em média a cada 4 a 5 meses” (SANEPAR, 1997, p.17), enquanto o LE aeróbico apresenta uma composição mais uniforme.

Tabela 10 – Composição média dos dois principais tipos de lodo do Paraná expressa em % em relação ao peso seco.

Lodo	N total	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	pH	M.O.	C	C/N
aeróbico									
ETE-BELÉM	4,91	3,70	0,36	1,59	0,60	5,9	69,4	32,1	6
anaeróbico									
RALF	2,22	0,95	0,34	0,83	0,30	6,1	36,2	20,1	9

Fonte: SANEPAR, 1997

Outro LE que também está sendo utilizado na agricultura é o lodo da CAESB (Companhia de Águas e Esgoto de Brasília). Conhecido como “adubo da CAESB, apresenta-se na forma de torta, com umidade em torno de 85%” (CAESB, / 1996? /). Apresenta as seguintes características:

¹⁵ Com o objetivo de gerar tecnologias e critérios seguros para o uso do LE como fertilizante, a SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná) desenvolveu a partir de 1993, um amplo programa multidisciplinar de pesquisas. Várias foram as instituições envolvidas: Universidade Federal do Paraná, Universidade Estadual de Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, Instituto Ambiental do Paraná, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, entre outras. Alguns dos resultados podem ser vistos em SANEPAR (1997).

Tabela 11 – Características físico-químicas do lodo produzido pelas estações de tratamento de esgoto de Brasília.

Característica	Concentração (%)
pH	7,8 – 8,0
Umidade	80 – 86
Matéria Orgânica	45 – 60
Nitrogênio	4,5 – 6,5
Fósforo	2,0 – 4,0
Potássio	0,3 – 0,4
Zinco	0,05 – 0,08
Cálcio	4,0 – 5,0
Magnésio	0,2 – 0,5
Ferro	2,0 – 4,0
Alumínio	1,0 – 3,0
Sódio	0,1 – 0,2
Cobre	0,01 – 0,02
Manganês	0,01 – 0,02

Fonte: CAESB, / 1996? /

4.2 Contaminantes e seus riscos

O LE pode apresentar em sua composição elementos químicos e biológicos indesejáveis do ponto de vista ambiental, ou seja, pode conter elementos que, em contato com o homem e/ou com a fauna e a flora, podem causar doenças e contaminações diversas. Portanto, qualquer decisão sobre o destino final mais apropriado para o LE depende da avaliação e minimização dos riscos de contaminação do ambiente e do homem. Vários são esses elementos que podem ser classificados em dois grandes grupos: contaminantes químicos e contaminantes biológicos.

No Brasil, a caracterização do LE torna-se importante uma vez que a rede de coleta residencial não é, na maioria das vezes, separada da rede de coleta industrial. Isto faz com que exista uma maior probabilidade de ocorrência de metais pesados e outros dejetos industriais no LE. Além disso, em muitas regiões existem problemas graves de saúde, o que pode fazer com que o LE apresente elevados teores de patógenos.

4.2.1 Contaminantes químicos

Entre os poluentes do LE, os contaminantes químicos constituem o maior grupo e devem ser constantemente monitorados, em função dos riscos de contaminação do homem, animais e plantas. Os contaminantes químicos estão divididos, neste estudo, em metais pesados e componentes químicos orgânicos.

4.2.1.1 Metais pesados

Dentre os diferentes contaminantes do lodo de esgoto, os metais pesados talvez sejam o grupo com a mais extensa literatura. Existe uma gama bastante ampla de estudos sobre a sua química, bioquímica, comportamento e caminhos no ambiente, consequências sobre plantas, animais, etc. Devido à gravidade das consequências a curto, médio e longo prazo dos metais pesados sobre o ambiente e sobre a saúde humana, deve-se fazer um estudo criterioso quando da aplicação em solos de lodo contaminado com esse tipo de substância.

Nesse sentido, a capacidade de assimilação de metais pesados pelos solos está relacionada com o comportamento químico deles após a aplicação do lodo. O seu deslocamento no ambiente, principalmente quanto à absorção, translocação e acumulação em plantas e animais, é uma variável crucial na determinação dessa capacidade. Espera-se que a barreira solo-planta¹⁶ seja eficiente na retenção e imobilização dos metais pesados no ambiente. Infelizmente, esse mecanismo nem sempre funciona eficientemente. E, quando funciona, a retenção pode não ser na sua forma inerte. Dessa maneira, a longo

¹⁶ Esse conceito, mencionado em Malavolta (1994), está relacionado com a capacidade do solo e das plantas reterem os metais pesados nos locais de aplicação, dificultando o deslocamento para outros locais na forma de poluentes.

prazo, os metais pesados podem sofrer um processo seletivo de transporte e acumulação, tomando-se potenciais problemas para o ambiente, fauna, flora e também para o homem.

A principal fonte desses elementos é o setor industrial. Direta ou indiretamente, eles participam em diferentes fases do processo de produção de inúmeras indústrias na área química, metalúrgica, eletro-eletrônica, etc. A tendência recente na legislação e no desenvolvimento dos processos industriais é na direção do tratamento e eliminação desses elementos na fonte. Isto é, existe um esforço para a disseminação de práticas e processos que eliminem esgotos livres desses contaminantes. Infelizmente, por uma série de razões, a presença de metais pesados nos esgotos é ainda uma realidade que deverá permanecer por algum tempo.

Conseqüentemente, de um lado, é necessário que o teor desses elementos no lodo seja constantemente monitorado. Por outro lado, o possível comportamento deles nas áreas de aplicação deve ser previamente estudado e monitorado na fase pós-distribuição do lodo.

A literatura especializada menciona, entre outros, os seguintes elementos como de maior preocupação: Arsênio (As), Boro (B), Cádmio (Cd), Cobre (Cu), Mercúrio (Hg), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), Selênio (Se) e Zinco (Zn). Alguns deles são nutrientes importantes no desenvolvimento de plantas. Porém, em teores elevados, podem causar sérios riscos para o desenvolvimento das plantas e para a saúde dos animais. Assim, o grande problema é o risco de acumulação desses elementos nos solos, nas plantas e nos animais e possivelmente nos homens.

Como já foi mencionado anteriormente, dependendo das características do solo, ocorrem reações químicas que transformam muitos desses elementos em formas insolúveis e inertes. Em países mais desenvolvidos, existem extensos estudos do comportamento desses elementos em diferentes condições. Esses conhecimentos

permitem desenvolver protocolos de aplicação de lodo em solos e monitoramento dos metais pesados ao longo do tempo.

De maneira bastante genérica, verifica-se na literatura que os estudos preocupam-se bastante com o cádmio. Ele apresenta características de toxicidade e de acumulação que o tornam problemático a longo prazo. Da mesma forma que o cobre, o níquel, o zinco e o molibdênio, as plantas podem acumular o Cádmio (Sommers & Barbarick, 1986). O consumo de plantas contaminadas com estes alimentos, pelos animais, pode gerar problemas na cadeia alimentar.

Alguns metais pesados são tóxicos para as plantas. Esse é o caso do cobre, níquel e zinco. No solo, em altos teores, eles prejudicam o desenvolvimento de muitas espécies de interesse agrícola. Nesse sentido, a aplicação de elevadas quantidades de lodo em solos agrícolas pode diminuir o potencial de produção deles.

O mercúrio e o chumbo são dois casos interessantes. Devido a acidentes ocorridos no passado, esses dois elementos foram bastante estudados e os problemas de intoxicação gerados por eles são extensamente relatados na literatura. Porém, Sommers & Barbarick (1986) mostram que, nos E.U.A., esses dois elementos não apresentam riscos elevados para o homem quando incorporados ao solo via lodo. Em primeiro lugar, eles adquirem formas minerais relativamente insolúveis no solo. Em segundo lugar, eles são relativamente imóveis em sistemas radiculares fibrosos. Finalmente, eles causam fitotoxicidade em concentrações muito abaixo daquelas problemáticas para os animais.

Cabe lembrar que a disponibilidade de muitos desses elementos, na forma catiônica, depende do nível de pH (acidez) do solo. Assim, as normas americanas enfatizam a necessidade de monitoramento do nível do pH em solos tratados com lodo de esgoto contaminado com metais pesados. Como regra geral, recomenda-se que o pH seja mantido em nível superior a 6,5.

Como consequência desses riscos, muitos países desenvolvidos realizaram estudos para auxiliar a determinação dos limites de teores para diferentes elementos no lodo. A Tabela 12, a seguir, apresenta os limites tolerados pelas legislações de alguns países, para determinados elementos. Da mesma forma, existem normas que limitam a carga anual (e a carga total) permitida para diferentes elementos em um determinado local.

É interessante observar na Tabela 12 as diferenças que existem entre os países. Matthews (1997) procurou explicar as diferenças que existem em especial entre os Estados Unidos e os países europeus. Estas diferenças podem ser explicadas através de diversos fatores, entre eles: variações na composição química dos lodos entre os países, diferenças edafo-climáticas, diferentes formas de agricultura, diferenças culturais e históricas, etc.

Tabela 12 - Teores máximos de metais pesados admitidos no lodo a ser utilizado na agricultura, segundo a legislação de diversos países (mg/kg de matéria seca).

Metal pesado	Dinamarca	Suécia	Alemanha	Suíça	Holanda	Escócia	França	Itália	Países Baixos	Bélgica	EUA
	(a)	(b)	(c)	(b)	(d)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)
Arsênio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75
Cádmio	0,8	15	10	30	10	20	20	20	1,25	12	85
Cromo	100	1.000	900	1.000	500	2.000	1.000	1.000	75	500	3.000
Cobre	1.000	3.000	800	1.000	600	1.500	1.000	1.000	75	750	4.300
Chumbo	120	300	900	1.000	500	1.500	800	750	100	600	840
Mercurio	0,8	8	8	10	-	-	10	10	0,75	10	57
Molibdênio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	75
Níquel	30	500	200	200	100	25	200	300	30	100	420
Selênio	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	100
Zinco	4.000	10.000	2.500	3.000	2.000	2.500	3.000	2.500	300	2.500	7.500
Prata	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cobalto	-	50	-	100	-	-	-	-	-	-	-
Manganês	-	-	-	500	-	-	-	-	-	-	-

(-) valor não determinado.

a - Grüttner, 1997

b - Fernandes et al., 1993

c - Bergs & Lindner, 1997

d - Silva, 1995

e - Nardin & Chabrier, 1997

f - Spinosa & Ragazzi, 1997

g - Dirkzwager, et al. 1997

h - Ockier & Muynck, 1997

i - Estados Unidos, 1995b

4.2.1.2 Contaminantes químicos orgânicos

Outra classe importante de contaminantes presentes no lodo de esgoto são os contaminantes químicos orgânicos. Existem centenas dessas substâncias que podem estar presentes no lodo, variando desde simples componentes do resíduo doméstico até produtos farmacêuticos complexos.

Poucos são os países que colocam restrições baseadas nos contaminantes químicos orgânicos para a utilização do lodo de esgoto na agricultura. Isto ocorre porque o assunto não foi ainda bem estudado. Existem muitas dúvidas a respeito do que vem a ser um contaminante químico orgânico, quais as vias e limites para a contaminação do homem e quais as consequências para a saúde humana. Este tópico fica como um alerta para a necessidade de se desenvolver estudos nessa área para as condições brasileiras.

4.2.2 Contaminantes biológicos

Por se tratar de um resíduo do tratamento de esgoto sanitário proveniente da atividade humana, diversos patógenos podem contaminar o LE. Muitos deles são organismos patógenos causadores de importantes doenças humanas. Porém, existem vários tratamentos eficazes para a redução dos principais patógenos, entre eles podem ser destacados os seguintes (Strauch et al., 1984):

- digestão (mesófila, termófila)
- compostagem
- desinfecção química
- lagoa de tratamento
- tratamento com cal (calagem)
- microondas, etc.

No Brasil, os tratamentos térmico (lodo fluidizado¹⁷) e químico (lodo prensado) apresentam excelentes resultados, conforme os resultados obtidos por Martins & Sanches (1986) sumariados na Tabela 13.

Tabela 13 - Porcentagem da redução de coliformes, estreptococos fecais, *Salmonellas* e ovos de helmintos nos tratamentos químico (lodo prensado) e térmico (lodo fluidizado).

Organismo	Lodo prensado % em relação ao lodo digerido		Lodo fluidizado % em relação ao lodo centrifugado (d)	
	Período a	Período b	Período a	Período b
Coliformes totais	99,9	99,6	99,2	205,5 c
Coliformes fecais	99,9	99,9	99,5	4,5 c
Estreptococos fecais	99,6	86,3	96,7	27,3 c
Salmonella spp.	98,7	96,4	29,3	63,6
Total de ovos de helmintos	99,6	99,4	96,4	94,9

Fonte: Martins & Sanches, 1986

Período a - março a agosto.

Período b - setembro a novembro.

c - aumento¹⁸.

d - Após trinta dias.

A eliminação dos patógenos no processo de tratamento do esgoto é importante, uma vez que, no solo, os diferentes patógenos podem apresentar tempos de sobrevivência relativamente elevados (Tabela 14). De um modo geral, as bactérias intestinais tendem a desaparecer, pois estarão em um meio pouco adequado à sua sobrevivência (LE

¹⁷ Martins & Sanches (1986) utilizam lodo digerido (na saída do biodigestor), lodo centrifugado (na saída da esteira) e lodo prensado (lodo digerido submetido a tratamento químico com cloreto férrico e cal) - Ver Figura 2 na pag. 32.

¹⁸ Martins & Sanches (1986) chamam a atenção para o fato de que o crescimento de alguns dos indicadores pode ter ocorrido devido a estocagem e secagem em pátios abertos.

ou LE incorporado ao solo). Já os parasitas encistados (helmintos e protozoários) e seus ovos, são mais resistentes (SANEPAR, 1997).

Tabela 14 - Tempo de sobrevivência de alguns patógenos no solo.

Organismo	Tempo de sobrevivência (dias)
Coliformes totais	4 ~ 77
Coliformes fecais	4 ~ 55
Estreptococos fecais	8 ~ mais de 70
Leptospira	menos de 15
Mycobacterium	10 ~ 500
Salmonella paratyphi	mais de 259
Salmonella typhi	11 ~ mais de 280
Streptococcus faecalis	26 ~ 77

Fonte: Adaptado de Harrison et al., 1996

A fim de garantir a disposição adequada do LE no Brasil, várias linhas de pesquisa tornam-se necessárias. A primeira delas refere-se a caracterização físico-química do lodo de esgoto, nos municípios. Este tipo de pesquisa é de extrema importância pois o Brasil possui cidades com características de desenvolvimento bastante distintas, ou seja, com diversos tipos de indústrias e populações com diferentes níveis de saúde. De acordo com o tipo de lodo gerado, determinadas alternativas de disposição serão mais viáveis que outras. Além do mais, com a caracterização do lodo de esgoto é possível identificar quais são os problemas ambientais e de saúde pública que a cidade possui, tais como lançamento de metais pesados no esgoto, infestações parasitárias, etc.

É importante salientar que esta caracterização deveria ser de responsabilidade das estações de tratamento de esgotos (públicas ou privadas) e o governo deveria estabelecer padrões de qualidade para o lodo de esgoto, a fim de garantir a qualidade deste material.

Conhecidas as características físico-químicas do lodo de esgoto e a existência ou não de contaminantes, pode-se estudar as alternativas existentes para a sua disposição. O capítulo seguinte apresenta algumas dessas alternativas, salientando seus benefícios e suas desvantagens.

5 ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DE ESGOTO

Como destino final para o LE, existem as seguintes alternativas:

- Aplicação em áreas degradadas
- Disposição em aterros sanitários
- Incineração
- Disposição no mar
- Aplicação na agricultura
- Aplicação em florestas

Diversos países têm enfrentado o problema da disposição adequada do LE, acumulando experiências bastante interessantes. Entre esses países, merecem destaque devido ao grande volume de lodo gerado os E.U.A, onde cerca de 36% do LE gerado por ano é aplicado na agricultura, em florestas e na recuperação de solos (Krauss, 1997). Na Tabela 15, pode-se observar a produção estimada e a disposição final de “biosólidos” para cada região de controle da EPA (Environmental Protection Agency).

Tabela 15 – Produção estimada e disposição final de LE por regiões da Environmental Protection Agency, Estados Unidos, 1997.

Região ^a	Produção total de sólidos secos (ton./ano)	Aplicação no solo ^b - %	Disposição no solo ^c - %	Incineração %	Outros %
Região 1	367.430	24,0	46	30,0	-
Região 2	605.046	30,0	14	23,0	33 ^d
Região 3	1.040.206	74,0	16	10,0	<1
Região 4	1.050.326	57,0	30	12,0	1
Região 5	1.705.316	51,0	2	30,0	17
Região 6	425.203	53,0	45	2,0	-
Região 7	511.712	65,5	4	25,5	5
Região 8	111.880	68,0	29	0,0	3
Região 9	819.050	51,0	36	4,0	7 ^e
Região 10	220.000	89,0	2	9,0	-

Fonte: Bastian, 1997

- a. Estas regiões estão assim divididas: **Região 1** - Connecticut, Maine, Massachusetts, New Hampshire, Rhode Island e Vermont; **Região 2** - New Jersey, New York, Puerto Rico; **Região 3** - Delaware, Distrito de Columbia, Maryland, Pennsylvania, Virginia e West Virginia; **Região 4** - Alabama, Florida, Georgia, Kentucky, Mississippi, Carolina do Norte, Carolina do Sul e Tennessee; **Região 5** - Illinois, Indiana, Michigan, Minnesota, Ohio e Wisconsin; **Região 6** - Arkansas, Louisiana, Oklahoma, Novo México e Texas; **Região 7** - Iowa, Kansas, Missouri e Nebraska; **Região 8** - Colorado, Montana, Dakota do Norte, Dakota do Sul, Utah e Wyoming; **Região 9** - Arizona, California, Havaí e Nevada; **Região 10** - Alaska, Idaho, Oregon e Washington.
- b. Aplicação no solo: inclui a aplicação de lodo líquido, desidratado, seco, composto, etc. na agricultura, em florestas, em áreas degradadas, como fertilizante e/ou corretivo de solos.
- c. Disposição no solo: inclui a disposição com outros materiais, sem fins de fertilização e/ou correção do solo.
- d. Transportado para outras regiões.
- e. Estocado.

A Europa unificada procura chegar a um padrão comum de disposição de LE, respeitando-se as particularidades de cada país. A disposição em aterros sanitários será permitida apenas na forma dos "resíduos últimos", ou seja, aqueles impróprios para a reciclagem e/ou com teor de água e de matéria orgânica menores do que 5% (Fernandes, 1997). A Tabela 16 mostra a produção e o destino do lodo de esgoto gerado em diversos países da Europa em 1990.

Tabela 16 – Produção e destino final de LE na Europa, 1990.

Produção de lodo		Destino			
País	Mat. Seca por ano (t x 10 ³)	Uso agrícola (%)	Disposição no solo (%)	Incineração (%)	Despejo no mar (%)
Alemanha	2.750	25	65	10	0
Bélgica	35	57	43	0	0
Dinamarca	150	43	29	28	0
Espanha	300	61	10	0	29
França	900	27	53	20	0
Grécia	200	10	90	0	0
Holanda	280	53	29	10	8
Irlanda	23	23	34	43	0
Itália	800	34	55	11	0
Luxemburgo	15	80	20	0	0
Portugal	200	80	12	0	8
Reino Unido	1.500	51	16	5	28

Fonte: Lue-Hing et al., 1994

Nota-se nesta tabela que existe uma tendência dos países europeus em dispor o LE no solo, seguida da utilização agrícola. A incineração não é uma prática muito utilizada, e o despejo no mar é apenas utilizado por 4 países. Davis & Hall (1997) assim dividiram a disposição final do LE: disposição no solo: 40%, agricultura: 37%, incineração: 11%, despejo no mar: 6%, outros: 6%. É importante salientar que as características geográficas e climáticas de cada país são fortes determinantes na solução encontrada para a disposição final do LE; logo, o Brasil também terá que levar em consideração estas características.

A seguir, é apresentada uma breve descrição sobre cada uma das alternativas e disposição do lodo de esgoto, abordando suas principais características, vantagens e desvantagens.

5.1 Aplicação em áreas degradadas

O LE pode ser utilizado para recuperar áreas degradadas, cujos solos sofreram profundas alterações físicas e/ou químicas e, conseqüentemente, apresentam condições impróprias ao desenvolvimento de vegetação. Exemplos de áreas degradadas são: mineração a céu aberto, barragens, áreas de empréstimos, acostamento de rodovias, etc.

Devido a suas propriedades físico-químicas (descritas no capítulo anterior), o LE pode ser utilizado nestas áreas a fim de recuperar as características necessárias para o desenvolvimento da vegetação. Normalmente, aplica-se, uma única vez, quantidades relativamente elevadas de LE. Nos E.U.A., a aplicação de LE nessas áreas chega a atingir dosagens de até 495 t/ha (Estados Unidos, 1995a).

No caso do Brasil, a SANEPAR (1997) realizou um estudo de recuperação de uma área degradada por mineração de calcário na Região Metropolitana de Curitiba. Foram aplicadas doses de LE de 40, 80 e 120 t/ha (peso úmido, 17% de sólidos). Infelizmente, o experimento foi de curta duração e os resultados obtidos não permitem conclusões definitivas.

A aplicação de um volume elevado em apenas um única vez traz vantagens e desvantagens. Como vantagem pode-se citar a economia de escala que pode ser obtida, diminuindo assim os custos de transporte e disposição. Por outro lado, as áreas degradadas normalmente não estão distribuídas de maneira homogênea. Além disso, as áreas podem ser bastantes heterogêneas do ponto de vista edafológico. Uma outra desvantagem é a utilização posterior da área. Caso ela venha a ser utilizada para a produção agropecuária, as altas doses de LE aplicadas devem ser reconsideradas, devido aos riscos de contaminação da produção.

Os custos para a aplicação de LE em áreas degradadas podem ser calculados através de uma planilha¹⁹ proposta por Estados Unidos (1995a), que leva em consideração a área necessária a cada ano para uma única aplicação. Pressupõe-se também, que a aplicação utiliza veículos próprios e desconsidera-se o custo de transporte até a área de aplicação (este custo seria calculado através de outra planilha). O exemplo abaixo mostra quais seriam os custos de capital, manutenção e operação da aplicação do LE em áreas degradadas de uma estação de tratamento que gerasse 550 t/dia (ou seja, cerca de 131.894,48 galões/dia - gpd²⁰), de um lodo contendo uma concentração de sólidos de 4% . Este volume diário corresponde a um volume anual de 8.126 toneladas de lodo seco. Utilizando-se de uma taxa de aplicação de 62 t/ha/ano de lodo seco, seriam necessários cerca de 132 ha para uma única aplicação.

Tabela 17 – Custo de capital, manutenção e operação^a da aplicação de LE em áreas degradadas, Estados Unidos, 1995.

Custos	US\$
A. Custo total do capital (Custo dos veículos para aplicação)	1.295.000,00
B. Custo anual total para manutenção e operação, US\$/ano (C + D + E + F + G + H + I)	1.807.657,80
C. Custo anual da mão de obra, US\$/ano	257.264,00
D. Custo anual do diesel, US\$/ano	49.038,88
E. Custo anual de manutenção dos veículos, US\$/ano	70.206,33
F. Custo anual de manutenção da área, US\$/ano	6.760,95
G. Custo de aquisição da área ^b	0,00
H. Custo da aplicação de calcário	52.986,50
I. Custo do gradeamento	1.371.401,14

Fonte: Estados Unidos (1995a) – valores calculados pelo autor

¹⁹ Esta planilha de custos está descrita no Anexo B.

²⁰ Para converter toneladas curta de LE em galões utiliza-se a seguinte equação, retirada de Estados

$$\text{Unidos (1995a): } \text{toneladas} = \text{galões} \times \frac{8.34\text{lb}}{\text{galões}} \times \frac{\text{toneladas}}{2000\text{lb}} \times \% \text{sólidos}.$$

- a. Além dos custos de manutenção e operação listados acima, a planilha da EPA propõe também custos para poços de monitoramento, que são exigidos por lei. Estes custos foram suprimidos deste exemplo, uma vez que no Brasil não existe ainda uma legislação específica que obrigue a construção de tais poços.
- b. Assume-se que não existe a necessidade de se adquirir a área.

5.2 Disposição em aterros sanitários

De acordo com CETESB²¹, citada por Jardim & Wells (1995), “aterro sanitário é um processo utilizado para disposição de resíduos sólidos no solo – particularmente lixo domiciliar – que, fundamentado em *critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite a confinação segura em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública*”.

Segundo Papaborello²², a ETE de Barueri (de responsabilidade da SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), em função de um acordo firmado com a LIMPURB (Departamento de Limpeza Urbana da Prefeitura de São Paulo), dispõe cerca de 160 toneladas de LE por dia no Aterro Sanitário da Bandeirantes (Rodovia dos Bandeirantes km. 25), arcando apenas com o custo de transporte deste material. Em troca, a SABESP compromete-se a tratar o chorume²³ gerado no Aterro Bandeirantes. Esta alternativa, segundo Papaborello, é bastante vantajosa para a SABESP, uma vez que os custos de tratamento do chorume são diluídos no tratamento de esgoto. A LIMPURB, por sua vez, não vê nenhum empecilho neste acordo, devido à pequena quantidade de LE que é depositada (cerca de 2,5% do total de resíduo que o

²¹ COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual de instruções básicas para a execução de aterro sanitário**. São Paulo, 1979. Anexo 3.

²² Papaborello, M.F. (LIMPURB – Prefeitura Municipal de São Paulo). Comunicação pessoal, 1997.

²³ Líquido percolado, decorrente da decomposição da matéria orgânica e outros materiais dispostos nas células do aterro. Apresenta uma DBO bastante elevada (~ 4000 mg /l).

Aterro recebe). Caso não houvesse este acordo, o custo para a disposição do LE seria de R\$ 46,15/t.

Esta alternativa porém, não é sustentável a longo prazo, devido à saturação da capacidade dos aterros. A aquisição de novas áreas é dificultada devido a uma série de fatores, entre eles: forte rejeição por parte da população em torno dos aterros, preço relativamente elevado das áreas existentes em torno das cidades, dificuldades em encontrar áreas que atendam às necessidades técnicas, etc. (LIMPURB, 1993). Outro ponto desfavorável desta alternativa é a tecnologia e o grau de conhecimento necessário para se operar um aterro dentro de condições mínimas necessárias de segurança e sustentabilidade.

5.3 Incineração

O LE pode ser eliminado através da incineração industrial, processo que consiste na secagem e combustão do material. Este processo ocasiona, além da emissão de gases e material particulado, uma pequena quantidade de cinzas, que pode ser considerada relativamente inerte. Uma das principais vantagens desse processo de disposição, é a redução de volume e a destruição e/ou redução de componentes orgânicos tóxicos (Estados Unidos, 1986). Existe também a possibilidade de recuperação de energia: um exemplo interessante é dado pela cidade de Los Angeles (E.U.A.), onde cerca de 250 a 300 t/dia de LE são incineradas, (helmintos e protozoários) a fim de gerar energia elétrica (Goldstein, 1992).

A incineração pode, por sua vez, ocasionar os seguintes impactos ambientais (Clay & Albon, 1996):

- impacto visual (decorrente da construção do incinerador e da fumaça produzida);

- contaminação de rios e aquíferos (provocada pelo vazamento de efluentes);
- poluição sonora (decorrente do funcionamento do incinerador);
- poluição do ar (causado pelo lançamento de diversos poluentes, como: monóxido de carbono, partículas, SO₂, etc.);
- aumento do tráfego de caminhões (utilizados para transportar o LE das ETEs até o incinerador).

Todos esses efeitos podem ser minimizados, porém, com elevados custos financeiros. Além disso, para se garantir uma queima eficaz e que não agrida o meio ambiente, o equipamento deve ser mantido em condições técnicas satisfatórias e constantemente monitorado (Clay & Albon, 1996).

Segundo CETESB (1997), existem no Estado de São Paulo apenas 5 incineradores considerados aptos a receber resíduos industriais (categoria na qual se enquadraria o LE). Nestes incineradores, o custo de processamento de um quilograma de resíduo varia de R\$ 1,00 a R\$ 2,00, dependendo das características do material²⁴. O custo de transporte do material até o incinerador fica por conta do gerador do resíduo. As cinzas decorrentes da incineração, na maior parte dos casos, são de responsabilidade da instalação (incinerador).

5.4 Disposição no mar

Esta alternativa consiste no lançamento do LE em alto mar. Ela foi bastante utilizada por cidades litorâneas como, por exemplo, Nova Iorque, nos E.U.A. Porém, estudos realizados pela EPA (Environmental Protection Agency) demonstraram os

²⁴ Informações obtidas através de contato telefônico e visita aos locais dos incineradores.

prejuízos ambientais de tal prática. Como consequência, desde julho de 1992, ela foi abolida naquele país (Mooney, 1992).

Para a região abordada neste estudo, essa última alternativa não apresenta viabilidade econômica devido à grande distância das cidades até a costa marítima.

5.5 Aplicação na agricultura e em florestas²⁵

Dentre as alternativas para a disposição final do LE, a aplicação na agricultura e/ou florestas pode ser considerada uma das mais promissoras, devido a sua sustentabilidade. É importante ressaltar que, devido às características físico-químicas do LE, sua aplicação deve levar em consideração uma série de fatores, entre eles:

- tipo de solo;
- tipo de cultura;
- teor de nutrientes do solo e do lodo;
- metais pesados presentes no solo e no lodo;
- outros contaminantes químicos presentes no lodo; e,
- contaminantes biológicos do lodo; etc.

Levando em consideração estes fatores, a aplicação de LE na agricultura e/ou florestas pode apresentar uma série de vantagens, uma vez que esse material, segundo Carvalho (1982), Bettiol (1982) e Boaretto (1986):

²⁵ Tanto a aplicação de LE na agricultura como em florestas podem ser estudadas em conjunto, uma vez que a finalidade é praticamente a mesma, ou seja, fornecimento de matéria orgânica e nutrientes para as culturas. Deve-se estar atento apenas para as características específicas de cada cultura (seja ela agrícola ou florestal) e, conseqüentemente, com os diversos riscos que cada aplicação apresenta.

- atua como fonte de nutrientes para as culturas;
- aumenta o teor de matéria orgânica no solo;
- diminui o teor de alumínio trocável;
- aumenta a produção de matéria seca, a absorção de N, P, Ca, Mg e Zn.;
- apresenta aumento significativo da CTC (Capacidade de Troca Catiônica) e do C-orgânico; e,
- melhora a estrutura do solo.

O LE apresenta um teor relativamente elevado de nitrogênio, e concentrações reduzidas de fósforo e potássio (Tabela 18) . Portanto, o LE não pode ser considerado um fertilizante orgânico substituto da adubação convencional. Ele deve ser visto como um complemento desta adubação, no sentido de reduzir a utilização de fertilizantes químicos e, com isto, reduzir o custo da adubação.

Tabela 18 - Comparação do nível de nutrientes entre fertilizantes químicos convencionais e lodo de esgoto.

	Nutrientes %		
	Nitrogênio	Fósforo	Potássio
Fertilizantes agrícolas típicos ^a	5	10	10
Valores típicos para lodo de esgoto estabilizado	3.3	2.3	0.3

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy, 1991

a. A concentração de nutrientes pode variar conforme o tipo de solo e as necessidades das culturas.

Já, ao comparar o LE com outros resíduos orgânicos, observa-se que ele apresenta teores de nitrogênio e fósforo acima dos demais (Tabela 19). Tanto o LE como os demais resíduos orgânicos podem apresentar variações em suas composições de acordo com o local de origem, sendo que os valores apresentados não devem ser considerados como uma regra.

Tabela 19 – Resultados comparativos de macronutrientes para diversos resíduos orgânicos.

Tipo de resíduo	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Matéria Orgânica
Lodo de esgoto	6,27	8,15	0,36	51,5
Esterco de galinha	5,00	2,00	2,00	-
Húmus de minhoca	1,50	1,90	0,20	80,0
Adubo de lixo	0,70	0,56	0,68	35,0

Fonte: CAESB, / 1996? /

5.5.1 Dosagens de aplicação de LE

Existe uma série de métodos que podem ser utilizados para a determinação das dosagens de aplicação, entre eles merecem destaque: cálculos baseados na concentração de metais pesados e baseados na concentração do nitrogênio.

Normalmente, as taxas de aplicação variam de acordo com as exigências nutricionais das culturas, levando-se em consideração as características do solo, do clima e do próprio lodo. De maneira geral, a taxa e dosagem de aplicação devem ser calculadas de maneira que:

- a. a produção e a qualidade do produto não decresçam;
- b. os solos não acumulem concentrações excessivas de metais pesados e matéria orgânica;
- c. os nutrientes e sais presentes no lodo não lixiviem, contaminando as águas subterrâneas; e,
- d. as culturas não fiquem contaminadas com patógenos que possam vir a constituir um risco para a saúde dos agricultores e consumidores.

Nos E.U.A existe uma grande diferença nas dosagens para os diferentes usos (Tabela 20)²⁶.

Tabela 20 - Taxas e frequência de aplicação do LE conforme o tipo de utilização.

Opção	Cronograma de aplicação	Taxa média t/ha
Agricultura	Anual	10
Floresta	Uma única vez ou com intervalo de 3 a 5 anos	45
Recuperação do solo	Uma única vez	100
Disposição sem finalidades agrícolas	Anual	340

Fonte: Adaptado de Reed et al., 1988

Como salientado anteriormente, o tipo de solo é determinante na dosagem e na taxa de aplicação do lodo. Uma das características do solo que deve ser observada é a sua declividade, pois o lodo aplicado pode se deslocar devido à erosão. Assim, para os solos com declive mais acentuados, recomenda-se a injeção do LE no subsolo e a adoção de métodos de controle da erosão para diminuir os riscos de descolamento do material aplicado para fora dos locais de tratamento. Essa preocupação é plenamente justificada na medida em que o LE pode conter substâncias químicas poluentes que, transportadas rios abaixo, podem contaminar a flora e a fauna aquáticas e os cursos d'água de uma maneira geral. Se esses cursos são aproveitados por alguma atividade humana, então os cuidados de aplicação de LE nas regiões de captação de sua bacia hidrográfica devem ser ainda maiores. A recomendação norte-americana pode ser vista na Tabela 21.

²⁶ Os solos norte-americanos possuem características edafo-climáticas bastante distintas dos solos brasileiros. Portanto, as recomendações que estão sendo aqui apresentadas devem ser reavaliadas para o caso brasileiro. Os valores apresentados podem servir como um ponto inicial de discussão.

Tabela 21 - Declividades recomendadas para aplicação de lodo.

Declividade (%)	Comentário
0-3	Ideal
3-6	Aceitável para aplicação em superfície ou injeção
6-12	Aceitável para injeção de lodo líquido
12-15	Incorporação imediata e medidas de controle da erosão são necessárias
+ de 15	Somente quando a permeabilidade for boa

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy, 1991

Outro ponto a ser observado no tipo de solo é a distância do lençol freático. Existe o risco de movimentação vertical de substâncias que compõem o LE. Nesses casos, se o lençol freático estiver situado próximo da superfície, existe o risco de sua contaminação. As recomendações norte-americanas são apresentadas na Tabela 22. No caso do Brasil, este problema não deve ser muito sério, pois a maioria de nossos solos são bastante profundos e os lençóis freáticos estão localizados a vários metros abaixo da superfície. Os maiores cuidados devem ser tomados nas aplicações em locais específicos, como aqueles encharcados (afioramento do lençol) e os próximos dos cursos d'água e minas.

Tabela 22 - Profundidade mínima (em m) do lençol freático para a aplicação de lodo de esgoto.

Tipo do local	Aquífero de água potável	Aquífero de exclusão
Agricultura	0,9144	0,4572
Floresta	1,8288	0,6096
Terras degradadas	0,9144	0,4572
Terras próprias para disposição	>0,9144	0,4572

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy, 1991

A fim de minimizar a possibilidade de contaminação do meio ambiente e/ou do homem, e ao mesmo tempo maximizar a resposta da cultura, SANEPAR (1997) elaborou uma metodologia de classificação do potencial dos solos para a aplicação de

LE. Esta metodologia seguiu o método “Sistema de Capacidades de Uso” para classificação de terras. A metodologia propõe três níveis de classificação: classe, subclasse e unidade de aptidão. A classe de aptidão corresponde ao nível mais geral de classificação, sendo assim dividida:

- I - Solo de potencial muito alto;
- II - Solo de potencial alto;
- III - Solo de potencial moderado;
- IV - Solo de potencial baixo; e,
- V - Solos inaptos.

Já, as subclasses de aptidão referem-se ao fator ou aos fatores de limitação que oferecem impedimentos à aplicação de LE. Estes fatores são os seguintes:

- PR – Profundidade;
- TE – Textura;
- ER – Suscetibilidade à erosão;
- DR – Drenagem;
- RE – Relevo;
- PE – Pedregosidade;
- HI – Hidromorfismo; e,
- FE – Fertilidade.

Por fim, a unidade de aptidão é o nível mais detalhado do sistema e caracteriza o grau de limitação do fator ou fatores que determinam a subclasse, sendo identificados por algarismos:

- 0 - nulo;
- 1 - ligeiro;
- 2 - moderado;
- 3 - forte; e,
- 4 - muito forte.

A combinação do critério de unidade de aptidão com a subclasse define a classe de aptidão, conforme pode ser observado no Quadro 1. A aplicação destes critérios com

base em levantamento e reconhecimento de solos possibilita a geração de mapas de áreas aptas²⁷.

SANEPAR (1997) salienta que na falta de mapas, as áreas aptas podem ser selecionadas com base nos critérios anteriormente descritos. De uma maneira geral, SANEPAR (1997) faz as seguintes recomendações para a escolha das áreas aptas a receber o LE:

- **Proximidade de residências:** distância mínima de 200 metros de residências, sempre considerando a direção dos ventos dominantes, a fim de evitar mau cheiro e atração de insetos vetores;
- **Declividade:** área ideal deve ser plana ou ter até 3% de declividade. Acima de 15% não se recomenda a aplicação, para evitar o transporte do lodo pela erosão;
- **Profundidade do solo:** distância mínima de 1,5 m entre a superfície do solo e a rocha intemperizada;
- **Lençol freático:** profundidade mínima de 1,5 m até o lençol;
- **Textura do solo:** ideal é que o solo tenha de 35 a 60% de argila;
- **Estrutura do solo:** evitar estruturas muito massivas que facilitam o transporte do lodo por erosão e diminuem a velocidade da biodegradação do lodo;
- **Acidez do solo:** pH entre 6,0 e 6,5, a fim de reduzir a absorção de metais pesados pelas plantas;
- **Capacidade de troca catiônica (CTC):** recomenda-se solos com alta CTC, reduzindo com isto a absorção de metais pesados pelas plantas; e,
- **Proximidade de corpos de água:** distância mínima de pelo menos 100 m entre a área de aplicação e os rios, lagos, etc.

²⁷ As terras da Região Metropolitana de Curitiba já estão classificadas para a aplicação de LE na agricultura, graças à metodologia de SANEPAR (1997).

Quadro 1 – Quadro guia para classificação dos solos aptos a receber LE²⁸.

Subclasse	Grau de Limitação	Classe de uso Potencial				
		I	II	III	IV	V
Profundidade	nulo	X	X	X	X	X
	moderado			X	X	X
	muito forte					X
Textura	nulo	X	X	X	X	X
	ligeiro		X	X	X	X
	moderado			X	X	X
	forte				X	X
	muito forte					X
Erosão	nulo	X	X	X	X	X
	ligeiro		X	X	X	X
	moderado			X	X	X
	forte				X	X
	muito forte					X
Drenagem	nulo	X	X	X	X	X
	moderado			X	X	X
	forte				X	X
	muito forte					X
Relevo	nulo	X	X	X	X	X
	ligeiro	X	X	X	X	X
	moderado			X	X	X
	forte				X	X
	muito forte					X
Pedregosidade	nulo	X	X	X	X	X
	muito forte					X
Hidromorfismo	nulo	X	X	X	X	X
	moderado			X	X	X
	muito forte					X
Fertilidade	nulo	X	X	X	X	X
	ligeiro		X	X	X	X
	moderado			X	X	X
	forte				X	X
	muito forte					X

Fonte: SANEPAR, 1997

Em Brasília, o LE, conhecido como “adubo da CAESB”, já vem sendo utilizado na agricultura a vários anos, mas os estudos em andamento ainda não permitem nenhuma recomendação agrônômica. O seu uso não é recomendado em hortaliças,

²⁸ Os critérios de avaliação dos fatores considerados para a classificação dos solos que irão receber LE estão localizados no Anexo C.

devendo ficar restrito a “culturas frutíferas, forrageiras, café, milho, plantas ornamentais e outros produtos agrícolas que não sejam consumidos crus” (CAESB, / 1996? /).

5.5.2 Respostas das culturas

No Brasil, vários estudos de adubação com LE foram elaborados abrangendo diferentes culturas. A Tabela 23 sumaria uma série deles, além de alguns estudos internacionais. A taxa de aplicação utilizada em cada estudo não pode ser considerada como uma recomendação, uma vez que estes estudos carecem de confirmação por parte das autoridades competentes, além de existirem divergências entre os LE utilizados em cada um deles. Porém, a maioria dos autores confirma que houve aumento da produção através da aplicação de LE.

Estudos mais recentes, realizados no Paraná pela EMBRAPA, pelo IAPAR e pela EMATER²⁹ mostraram que “a incorporação de LE ao solo levou a aumentos na produtividade de 20 a 50%, para vários tipos de culturas³⁰” (SANEPAR, 1997, p.vii). No caso da cultura do milho, estudos da EMATER-PR, na região de Curitiba, mostraram aumentos da produtividade que variaram entre 30 a 77% (SANEPAR, 1997).

²⁹ Respectivamente: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Instituto Agrônômico do Paraná e Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural

³⁰ SANEPAR (1997) recomenda a aplicação de LE nas seguintes culturas: milho, trigo, aveia, cana-de-açúcar, feijão, laranja, café e maçã, bracatinga, pinus e eucalipto.

Tabela 23 - Estudos de adubação com lodo de esgoto, culturas e dosagens de aplicação.

Cultura	aplicação	fonte
arroz	640 microgramas de Cd/gr. Solo	Santos, 1979
arroz	9 t/ha	Bettiol et al., 1983
café	2 t/ha	Boaretto, 1986
cana	40 t/ha	Silva, 1995
cana	32 t/ha	Melo et al., 1994
cana	32 t/ha	Marques, 1990
cana - planta	4 a 8 t/ha	Silva, 1995
cana - planta	16 e 32 t/ha	Silva, 1995
cebola	5.6-7.5 t/ha	Boaretto, 1986
eucaliptos	20 t/ha	Harrison et al., 1996
feijão da seca	3-6-9 t/ha	Boaretto, 1986
feijão das águas	3-6 t/ha	Boaretto, 1986
milheto	160 t/ha	Da Ros et al., 1993
milho	63 t/ha	Defelipo, et al. 1991
milho	9 t/ha	Bettiol at al., 1983
milho	80 t/ha	Berton et al., 1989
milho	896 mt/ha	Hinesly et al., 1984
milho	4-6-9 t/ha	Boaretto, 1986
pinus	15 t/918m2	Ouanouki & Igoud, 1993
quiabo	20 t/ha	Paulraj & Ramulu, 1994
repolho	170 microgramas. Cd/gr. solo	Santos, 1979
soja	4 a 13 microgramas Cd/gr. solo	Santos, 1979
soja	9 t/ha	Bettiol, 1982
sorgo	112.5 g/vaso	Defelipo, et al. 1991
sorgo	20 t/ha	Oliveira, 1992
tomate	20 t/ha	Paulraj & Ramulu, 1994
tomate	4-8-12 t/ha	Boaretto, 1986

5.5.3 Custos de aplicação de LE na agricultura e em florestas

Os custos para a aplicação de LE na agricultura e em florestas podem ser calculados através de planilhas de custo³¹ propostas por Estados Unidos (1995a). Ao

³¹ Estas planilhas de custos estão descritas no Anexo B.

contrário da planilha de custo para áreas degradadas (ver pag. 62), as planilhas para agricultura e floresta levam em consideração a área necessária a cada ano para diversas aplicações. Nestas planilhas também assume-se que a aplicação utiliza veículos próprios e também desconsidera-se o custo de transporte até a área de aplicação. O mesmo exemplo utilizado para áreas degradadas (ver pag. 63) é utilizado para a agricultura e floresta. Utilizando-se para a agricultura uma taxa de aplicação de 9,9 t/ha, seriam necessários cerca de 823 ha para depositar todo o LE gerado. No caso da aplicação em florestas, com uma taxa de aplicação de 50 t/ha, a cada 5 anos, seriam necessários 823 ha.

Pode-se observar no Gráfico 1 que a aplicação de LE na agricultura apresenta custos de capital elevados, porém os menores custos de operação e manutenção. Os maiores custos de capital são observados na aplicação em florestas, enquanto que os maiores custos de manutenção e operação são observados na recuperação de áreas degradadas.

OBS:

O&M - Operação e Manutenção

Gráfico 11 - Custos de aplicação de LE na agricultura, em florestas e em áreas degradadas, Estados Unidos, 1995.

Tabela 24 – Custo de capital, manutenção e operação da aplicação de LE na agricultura, Estados Unidos, 1995.

Custos	US\$
A. Custo total do capital (B + C + D + E)	2.391.573,42
B. Custo de aquisição da terra ^a , \$	0,00
C. Custo da aplicação de calcário, \$	83.305,63
D. Custo do gradeamento, \$	828.267,79
E. Custo dos veículos para aplicação, \$	1.480.000,00
F. Custo anual total para manutenção e operação, US\$/ano (G + H + I + J)	416.765,30
G. Custo anual de mão de obra, \$/ano	252.013,71
H. Custo anual do diesel, \$/ano	49.038,88
I. Custo anual de manutenção dos veículos, US\$/ano	70.206,33
J. Custo anual de manutenção da área, US\$/ano	45.506,38

Fonte: Estados Unidos (1995a) – valores calculados pelo autor

a. Assume-se que não existe a necessidade de se adquirir a área.

Tabela 25 – Custo de capital, manutenção e operação da aplicação de LE em florestas, Estados Unidos, 1995.

Custos	US\$
A. Custo total do capital (B + C + D + E)	3.186.193,14
B. Custo de aquisição da terra ^a , \$	0,00
C. Custo de limpeza da área, \$	165.653,56
D. Custo do gradeamento, \$	248.539,58
E. Custo dos veículos para aplicação, \$	2.772.000,00
F. Custo anual total para manutenção e operação, US\$/ano (G + H + I + J)	790.067,22
G. Custo anual de mão de obra, \$/ano	551.280,00
H. Custo anual do diesel, \$/ano	62.649,99
I. Custo anual de manutenção dos veículos, US\$/ano	137.131,76
J. Custo anual de manutenção da área, US\$/ano	39.005,47

Fonte: Estados Unidos (1995a) – valores calculados pelo autor

a. Assume-se que não existe a necessidade de se adquirir a área.

A escolha entre as diferentes alternativas não deve levar em consideração apenas os custos de aplicação. Além das recomendações técnicas/agronômicas, existem outros fatores que devem influenciar na escolha. Por exemplo: a aplicação em florestas necessita de praticamente a mesma quantidade de área que a aplicação na agricultura, porém esta aplicação só pode ser feita a cada 5 anos, enquanto que a agricultura pode receber o LE durante vários anos seguidos. A aplicação em áreas degradadas, apesar dos altos custos, necessita de uma menor área, porém apresenta a desvantagem de ser feita uma única vez.

Enfim, na disposição final do LE, devem ser levadas em consideração todas as recomendações técnicas/agronômicas listadas anteriormente e o seu custo final irá depender das alternativas existentes para a área em questão.

5.5.4 Outras formas de aplicação do LE na agricultura e em florestas

Além da aplicação *in natura*, ou seja, da aplicação do LE tal como ele foi gerado na estação de tratamento de esgoto, existem outras formas de dispor este material na agricultura e/ou em florestas. O LE pode, por exemplo, servir como matéria-prima para a fabricação de fertilizantes orgânicos³².

Uma das maneiras mais simples de se fabricar um fertilizante orgânico é através da compostagem. Por compostagem, entende-se o processo biológico pelo qual a matéria orgânica existente no resíduo é convertida em outra mais estável pela ação de microorganismos já presentes no próprio resíduo (Rizzini, 1996). A compostagem pode ser feita apenas com o LE ou então misturando-se outros materiais orgânicos (restos de culturas, palhadas, restos de alimentos, etc.). Existem diversos meios de se conseguir a compostagem de um material, não cabendo a este estudo a discussão de cada um deles.

³² O LE em si não pode ser considerado um fertilizante orgânico, conforme discutido na pag. 68.

Existem várias vantagens em se realizar a compostagem do LE. Uma delas é que a compostagem pode higienizar o LE, ou seja, pode reduzir seus principais patógenos (ver Contaminantes Biológicos). Além disto, é possível através da adição de outros materiais suprir as deficiências nutricionais do LE. Essas vantagens levam à produção de um material mais confiável, com maior aceitação por parte da população (Goldstein et al., 1992 e Bye, 1991).

Vários países utilizam-se da compostagem a fim de conseguir um produto com melhores características para a aplicação na agricultura e/ou em florestas. Um deles é os E.U.A. onde, no ano de 1992, existiam 159 empresas de compostagem de LE. Os custos destas empresas variavam de US\$ 19 a US\$ 300 por tonelada de composto (Goldstein et al., 1992). Exemplos de outros países são: França (Levasseur & Mousty, 1985) e Reino Unido (Bardos et al., 1992).

No Brasil, Corrêa et al. (1982) e Carvalho (1982) realizaram estudos sobre a viabilidade de produção de fertilizantes orgânicos a partir da compostagem do LE. Ambos os estudos recomendam a implantação de tal tecnologia, em especial o de Corrêa et al., que destaca as seguintes vantagens: custo de implantação satisfatório, tecnologia viável, rentabilidade satisfatória (no que diz respeito à comercialização do fertilizante), e uma rentabilidade energética (produção de biogás).

Na Universidade Federal de Viçosa foram desenvolvidas, a partir de 1993, experimentos com a compostagem do LE. Como resultado, houve “a estabilização da matéria orgânica e a eliminação de microorganismos patogênicos ... além de produzir, ao fim da fase de maturação, um material tipo húmus, inodoro, com excelentes características físicas, o que lhe proporciona grande capacidade de retenção de umidade e melhoria da estrutura de solos” (Gouvêa, 1995). Também Fernandes et al. (1993) constataram que a compostagem de LE com bagaço de cana-de-açúcar gerou um

fertilizante orgânico com relação C/N entre 12 e 24, facilidade de manuseio, e com 7 a 10% de material húmico solúvel em meio básico.

Além da compostagem, existem outras maneiras de transformar o LE em um fertilizante orgânico. Uma delas é a peletização, processo que consiste na secagem e na adição de nutrientes ao LE, gerando como produto “pellets”. Nos E.U.A. existem vários fertilizantes orgânicos peletizados a partir do LE. Os preços destes fertilizantes (por tonelada de nitrogênio) variam de US\$ 13 a US\$24 (Girovich, 1990). Estes produtos apresentam uma série de vantagens: tamanho homogêneo (facilitando o transporte, distribuição e aplicação), durabilidade (são materiais estabilizados), ausência de patógenos, maiores teores de nutrientes, etc.

Independente da alternativa escolhida para a disposição final do lodo de esgoto, é necessário que haja algum tipo de regulamentação a fim de se garantir a segurança dos agentes envolvidos, assim como também do meio ambiente. Vários países já possuem legislações específicas para cada tipo de disposição. No capítulo seguinte, discute-se a legislação norte-americana para utilização agrícola do lodo de esgoto e propostas de legislação para o caso brasileiro.

5.6 Participação pública

Em qualquer método de disposição final do LE, a participação pública é fundamental para o sucesso do programa; em especial se a forma de disposição escolhida afetar diretamente ou indiretamente a população ao redor.

Diversos autores chamam a atenção para a importância de programas de conscientização e participação da população. O'Dette (1995) afirma que quanto maior o nível de conscientização da população menos controvérsias e barreiras surgirão. E para

conscientizar a população, nada melhor do que educação e comunicação. Para Logsdon (1992), a educação é a única maneira de conscientizar a população sobre os benefícios e riscos da utilização e /ou disposição do LE, sendo que os recursos financeiros gastos com a educação são menores do que os custos provenientes da má informação.

Estados Unidos (1995a) salienta que um ponto crítico no estabelecimento de um programa de utilização de LE na agricultura é a participação das comunidades locais desde o início da discussão do projeto, passando por todas as suas fases. Seu estudo apresenta uma série de mecanismos para promover a participação pública. A escolha entre os diversos mecanismos irá depender das restrições monetárias e do tempo que o programa enfrenta e, em especial, dos objetivos a serem alcançados, uma vez que cada mecanismo possui limitações e vantagens, como pode ser observado na Tabela 26. Como ressalva, o estudo sugere que haja uma boa flexibilidade por parte da população e dos técnicos, a fim de acomodar diversos pontos de vistas e detalhes que irão surgir no decorrer da implantação do projeto.

Stark (1993) mostrou como a utilização de demonstrações no campo, programas escolares, visita a museus, desenvolvimento e distribuição de “kits” educacionais, além da participação das universidades, beneficiaram a utilização de LE na agricultura no estado de Minnesota, nos E.U.A. Walker (1986), por sua vez, afirma que palestras para divulgação do programa de disposição final de LE são um ponto chave para o sucesso do programa. Nestas palestras torna-se importante: mostrar de forma clara e direta os benefícios e riscos reais de cada alternativa, através da exposição por parte de profissionais competentes e independentes (ligados às universidades, órgãos de pesquisa, etc.); se possível, levar dados empíricos obtidos na região; trabalhar em parceria com autoridades e líderes comunitários locais; identificar grupos hostis; refutar de maneira clara e científica críticas e experiências fracassadas, etc. Tudo isto deve ser feito com o auxílio de material de propaganda e divulgação.

Tabela 26 – Grau de abrangência dos diversos mecanismos de participação pública.

Mecanismo de participação pública	Características de Comunicação		
	Nível de contato público	Habilidade em lidar com interesse específico	Nível de feedback
Palestras	M	B	B
Reuniões abertas	M	B	M
Reuniões com comitês	B	A	A
Mala direta	M	M	B
Contato pessoal	B	A	A
Artigos em jornais	A	B	B
Panfletos	A	B	B
Apresentações com audiovisual	M	B	B
Anúncios em jornais	A	B	B
Cartazes, outdoors	A	B	B
Workshops	B	A	A
Programas de rádio	A	M	A
Excursões	B	A	A
Ombudsman	B	A	A
“Task force”	B	A	A
Contatos telefônicos	A	M	M

Fonte: Estados Unidos, 1995a

A – Alto

M – Médio

B – Baixo

Albrecht (1984) apresenta algumas observações baseadas em sua experiência empírica que podem ser assim resumidas: 1 – informação pública não significa consentimento: às vezes, quanto maior o nível de informação, maior será a tendência das pessoas em votar contra o projeto; 2 – honestidade é essencial, enquanto que detalhamento completo não é: muitas vezes é preferível simplesmente admitir que existem falhas a serem resolvidas do que tentar detalhar em mínimos detalhes os pontos favoráveis do projeto; 3 – é importante acentuar sempre os aspectos positivos e nunca esconder os aspectos negativos; 4 – é necessário respeitar os cronogramas, evitando atrasos; 5 – é preciso envolver individualmente as pessoas ao projeto: só assim elas se sentirão afetadas e darão uma contribuição efetiva; 7 – nunca menosprezar o cidadão isolado; 8 – algumas pessoas nunca serão convencidas: o melhor a fazer é isolá-las.

No caso específico da utilização na agricultura e/ou em florestas, um ponto a ser trabalhado para a aceitação da disposição final do LE é o conflito que existe entre campo e cidade. Segundo Sopper (1993), muitas pessoas não são contra o LE em si, mas não concordam com a disposição de resíduos gerados nas cidades e lançados nas áreas rurais. Para este autor, somente através da educação é que se consegue a aceitação pública. Forster & Southgate (1984) são outros autores que chamou a atenção para o problema da “ideologia agrária”, segundo a qual, a vida nas áreas rurais é melhor do que a vida nas cidades, portanto, os resíduos gerados nas cidades devem ser resolvidos nos próprios centros geradores e não “empurrados” para o campo. Para este autor, os agricultores possuem uma consciência ambiental desenvolvida, segundo a qual eles se consideram os “guardiães dos recursos naturais para as gerações futuras”.

Dentro do grupo dos agricultores, o sexo, a idade, o nível de educação e a experiência anterior são fatores que irão influenciar na participação pública (Forster & Southgate, 1984). Mulheres são menos suscetíveis à aceitação do LE, pois tradicionalmente, as mulheres são responsáveis pela saúde da família. Quanto à idade, o que este autor observa é que quanto mais velhos, menor é a aceitação. O contrário vale para o nível de educação, quanto maior o nível, maior a aceitação. Agricultores que já tiveram algum tipo de experiência com a utilização de resíduos, se mostrarão mais suscetíveis à utilização do LE.

Basicamente, os agricultores estão preocupados, em primeiro lugar com as implicações econômicas a curto prazo. Em seguida, existem preocupações com a contaminação da população, contaminação do ambiente, contaminação do produto, odor, tráfego de caminhões, perda de valor da terra, etc. (Forster & Southgate, 1984; Forster et al., 1981 e Forster et al., 1976).

Os pontos anteriormente levantados acima também foram identificados no Brasil por Shirota & Rocha (1997). Estes autores entrevistaram diversos agricultores da região

de Limeira (interior de São Paulo) e constataram que a grande maioria já utilizou algum tipo de resíduo, buscando, com isto, alternativas economicamente viáveis à adubação convencional. Estes agricultores estavam preocupados com os custos de aplicação e de retorno sobre as culturas, ou seja, implicações econômicas a curto prazo, do ponto de vista privado. Por haver uma falta de conhecimento sobre o LE, muitos dos agricultores não souberam identificar quais seriam os riscos da utilização do LE, ficando, com isto, suscetíveis a falsas interpretações e manipulações contrárias ou favoráveis à utilização do LE.

6 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

A humanidade desenvolveu-se nos últimos anos em função de tecnologias e sistemas de produção baseados na utilização dos recursos naturais e no despejo dos resíduos não aproveitáveis no meio ambiente. Por vários anos, o homem não teve a preocupação em repor os recursos utilizados e em auxiliar o meio ambiente no processo de assimilação dos resíduos. Hoje, porém, o homem sabe que muitos recursos são classificados como não-renováveis, e que o meio ambiente possui um limite de assimilação. Portanto, a proteção do meio ambiente é uma condição necessária para a continuação do desenvolvimento sócio-econômico. Por proteção ambiental entende-se uma série de medidas de caráter econômico, político e social, que visam o desenvolvimento sustentável da humanidade.

Quaisquer medidas que forem tomadas, existe a necessidade de regulamentação, ou seja, a necessidade de impor normas e leis a fim de que determinados padrões e diretrizes sejam seguidos. No caso específico da disposição final do LE, diversos países elaboraram padrões e diretrizes para as diversas alternativas de disposição³³. Estes padrões e diretrizes foram elaborados de acordo com as características de cada país, e de acordo com as características físico-químicas do LE.

³³ Um exemplo desta normatização pode ser visto na Tabela 12, onde são apresentados os teores máximos de metais pesados admitidos no lodo a ser utilizado na agricultura, segundo a legislação de diversos países.

6.1 Legislação norte-americana – a “503”

Um país que merece destaque tanto pelo rigor, como pela maneira que conduziu a elaboração das normas para a disposição final do LE, são os EUA. Conhecida como “503”, a legislação norte-americana, intitulada “Padrões para o uso e disposição do lodo de esgoto”, foi publicada pela EPA (Environmental Protection Agency) em fevereiro de 1993, depois de mais de 15 anos de pesquisa e discussões (Foess & Sieger, 1993). Os impactos econômicos desta legislação foram estimados pela EPA, citado por Kuchenriether (1989), em US\$ 157 milhões.

Basicamente, esta legislação cobre três categorias para a disposição final do LE: **aplicação no solo** (abrangendo aplicação na agricultura, em jardins, florestas e em áreas degradadas), **disposição no solo** (sem finalidade de fertilização ou correção das características físico-químicas), e a **incineração do LE**³⁴.

Não se incluem a co-disposição e/ou incineração do LE com outros materiais. Estão sujeitas a esta legislação as estações de tratamento de esgoto públicas e privadas, assim como qualquer pessoa que utilizar ou dispor o LE gerado por estas estações (Goldstein, 1993).

As características mais marcantes desta lei foram: a EPA coletou e analisou inúmeros dados sobre o LE que estava sendo gerado e a forma como ele estava sendo disposto; a EPA utilizou os caminhos de contaminação mais restritivos, ou seja, aqueles que dariam maior grau de confiabilidade; foram estipulados LE de “qualidade excepcional”; e por fim foi definido que todos os estados deveriam atingir padrões nacionais mínimos. Ela também foi “auto-implementada”, ou seja, independente de autorizações e

³⁴ Como o objetivo principal deste trabalho é estudar a utilização agrícola do LE, a legislação referente à disposição no solo e à incineração não serão abordadas. Para maiores esclarecimentos a respeito destes dois tópicos ver Sigmund & Sieger (1993) e Bauer & Sieger (1993).

fiscalizações, todos os indivíduos que lidassem com LE deveriam segui-la (Donovan, 1993).

Entre os diversos contaminantes que foram incluídos na “503”, merecem destaque os metais pesados (arsênio, cádmio, cobre, chumbo, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco) e os patógenos (coliformes fecais, ovos de helmintos e *salmonellas*). Além disto, a aplicação do LE deve ser feita de maneira a reduzir a atração de vetores de doenças, tais como ratos, pássaros, etc. (WEF, 1993).

Conforme as concentrações de patógenos, o LE é classificado em duas classes: A ou B. A classe A apresenta parâmetros mais restritivos, de forma que o LE enquadrado dentro desta classe pode ser aplicado em jardins e gramados residenciais. Já a classe B apresenta os parâmetros mínimos necessários para que o LE possa ser aplicado na agricultura, em florestas ou em áreas degradadas (WEF, 1993). Tratando-se de patógenos, os seguintes parâmetros devem ser atingidos pelas classes A e B (Foess & Sieger, 1993):

- **Classe A** - conter no máximo 1.000 NMP (número mais provável) de coliformes fecais por grama de resíduo seco, ou 3 NMP de *Salmonella*/4 gramas de resíduo seco e conter menos do que 1 ovo de helminto/4 gramas de resíduo seco.
- **Classe B** - conter uma concentração de coliformes fecais inferior à 2.000 NMP/g resíduo seco.

Quanto à redução de vetores, são propostas duas alternativas: o tratamento do LE ou o uso de barreiras físicas. Conforme o tratamento do LE, são propostos os seguintes parâmetros (Foess & Sieger, 1993):

- a. **estabilização alcalina:** atingir pH igual a 12 por no mínimo 2 horas e permanecer no pH 11,5 por 22 horas;
- b. **compostagem:** atingir temperatura acima de 40°C por no mínimo 14 dias;

- c. **digestão anaeróbia:** reduzir os sólidos voláteis no mínimo a 38%;
- d. **digestão aeróbia:** reduzir os sólidos voláteis no mínimo a 38%;
- e. **secagem térmica:** atingir 75% de sólidos totais se o lodo primário não estabilizado não estiver presente e 90% de sólidos totais se o lodo primário não estabilizado estiver presente;
- f. **injeção em subsuperfície:** assegurar que nenhuma quantidade significativa de lodo esteja presente na superfície após uma hora da aplicação. Para lodo classe A a injeção deve ocorrer até no máximo 8 horas após a descarga do processo de tratamento para patógeno;
- g. **aplicação em superfície:** incorporar o lodo em até 6 horas após a aplicação no solo.

Em relação a metais pesados, a EPA estabeleceu várias concentrações permissíveis (Tabela 27).

Tabela 27 – Limites de concentração de metais pesados no LE, adotados pela EPA, para aplicação no solo.

	1 – Concentrações máximas Mg/kg	2 – Limite de carga cumulativa Kg/ha	3 - Limites de con- centrações Mg/kg	4 - Razão de carga anual Kg/ha ano
Arsênio	75	41	41	2
Cádmio	85	39	39	1,9
Cobre	4300	1500	1500	75
Chumbo	840	300	300	15
Mercúrio	57	17	17	0,85
Molibdênio	75	-	-	-
Níquel	420	420	420	21
Selênio	100	100	100	5
Zinco	7500	2800	2800	140

Fonte: Estados Unidos, 1995b

A coluna 1 da Tabela 27 refere-se às concentrações máximas de metais pesados permitidas no LE para que este possa ser aplicado no solo, desde que a aplicação atenda aos limites de carga cumulativa da coluna 2. A coluna 3 apresenta as concentrações má-

ximas permitidas no LE para a aplicação em jardins e gramados residenciais, enquanto que a coluna 4 apresenta a razão de carga anual permitida por ano.

Além dos parâmetros de concentração de patógenos, da redução da atração de vetores e metais pesados, a “503” determina uma série de medidas que devem ser tomadas ao se aplicar o LE no solo, entre elas: não aplicar em áreas cobertas por neve, não aplicar a distância inferior de 10 metros de cursos d’água; não aplicar em locais que possam ameaçar a fauna ou a flora; não aplicar com taxas superiores à taxa agronômica. Uma outra exigência da “503” é que sejam feitos monitoramentos, registros e relatórios sobre o destino final do LE (WEF, 1993; Sieger & Hermann, 1993).

Uma maneira de entender a “503” é através de um fluxograma (Figura 4 pag. 73), tal como proposto por Sieger & Hermann (1993). Os critérios para a redução da atração de patógenos são os seguintes³⁵:

1. Redução de sólidos voláteis para o mínimo de 38%
2. Digestão anaeróbia
3. Digestão aeróbia
4. Taxa específica de consumo de oxigênio igual ou inferior a 1,5 mg/hora/grama de sólidos totais a 20 °C
5. Mínimo de 14 dias em processo aeróbio com temperatura média superior a 45°C
6. Estabilização alcalina por 24 horas
7. Secagem térmica a fim de atingir 75% de sólidos totais se o lodo primário não estabilizado não estiver presente
8. Secagem térmica a fim de atingir 90% de sólidos totais se o lodo primário não estabilizado estiver presente
9. Injeção em sub-superfície
10. Incorporação ao solo

³⁵ Uma descrição mais detalhada sobre estes critérios pode ser obtida em Estados Unidos, 1992.

Um sumário dos requerimentos da “503” para os diferentes tipos de LE pode ser visto na Tabela 28.

Tabela 28 – Requerimentos da “503” para diversos tipos de LE.

Tipo de LE^a	Limite de Concentração máxima – coluna 1	Outros limites	Classe de patógenos	Redução de atração de vetores	Restrições de local	Práticas de manejo	Monitoramento de poluentes
“Qualidade excepcional”	Sim	Limite de concentração – coluna 3	A	Uma das opções de 1 a 8	Não	Não	Não
“Limite de concentração”	Sim	Limite de concentração – coluna 3	B	Uma das opções de 1 a 10	Sim	Sim	Não
“Limite de carga cumulativa”	Sim	Limite de carga cumulativa – coluna 2	A ou B	Uma das opções de 1 a 10	Não - Classe A e sim - Classe B	Sim	Sim
“Razão de carga anual”	Sim	Razão de carga anual – coluna 4	A	Uma das opções de 1 a 8	Não	Sim	Não

Fonte: Estados Unidos, 1995a

a. Todos os tipos de LE devem respeitar as exigências de monitoramento, registro e relatórios.

6.2 Legislação brasileira

Infelizmente, o Brasil não possui ainda uma legislação específica para a disposição final do LE, em especial para a aplicação na agricultura, em florestas e em áreas degradadas. Porém, existe uma série de leis e normas que devem ser respeitadas. É o caso da NBR 10.004 (Norma Brasileira Registrada) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Ela é responsável pela classificação dos resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. A definição de resíduo sólido, segundo ABNT (1987) abrange os resíduos no:

“... estado sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição **os lodos provenientes de sistema de tratamento de água**, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle da poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isto soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Segundo esta norma o LE pode ser enquadrado na Classe II (não-inertes): “são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – perigosos ou de resíduos classe III – inertes”. A Classe II pode apresentar as propriedades de combustibilidade, biodegradabilidade e solubilidade em água, porém não pode apresentar as propriedades de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, típicas da Classe I. Além disto, a norma é explícita em afirmar que os resíduos gerados nas ETES não se incluem na Classe I (ABNT, 1987).

As normas complementares à NBR 10.004 são: a NBR 10.005 – Lixiviação de resíduos; NBR 10.006 – Solubilização de resíduos; NBR 10.007 – Amostragem de resíduos; ASTM D 93 – Flash Point by Pensky Martens Closed Tester; NACE TM-01-69 – Laboratory Corrosion Testing of Metals for the Process Industries.

Além da ABNT, outro órgão a ser consultado a respeito de normas e leis para a disposição final do LE, é a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Segundo esta entidade, “o transporte de lodos provenientes de unidades de tratamento de água, esgotos ou de efluentes líquidos industriais” devem ser licenciados segundo os memorandos 138/94 M e 227/94/I. O memorando 138/94 M apresenta uma lista de exigências técnicas a serem respeitadas para o licenciamento de empreendimentos de coleta, transporte e disposição de lodos (CETESB, 1997):

- a. Os lodos de origem industrial ou não-industrial deverão ser tratados e/ou dispostos em instalações aprovadas pela CETESB;
- b. O tratamento ou disposição final dos lodos gerados em estabelecimentos industriais deverá ser precedido da obtenção de CADRI – Certificado de Aprovação de Destinação de Resíduos Sólidos Industriais – junto à CETESB;
- c. Não poderão ser misturados, no transporte, lodos provenientes de diferentes indústrias;
- d. A lavagem dos veículos deverá ser executada em locais e condições apropriadas, de forma a não causar poluição das águas, do ar e do solo;
- e. As caçambas utilizadas no transporte de lodos deverão ser estanques, não possibilitando vazamentos na coleta, no transporte e na descarga do material;
- f. Caso os lodos sejam classificados como perigosos (de acordo com a NBR 10.004), todos os serviços deverão ser desenvolvidos em conformidade com o disposto no Decreto 96.044/88 do Ministério dos Transportes³⁶, bem como nas Normas NBR 7.500, NBR 7.501, NBR 7.502, NBR 7.503 e NBR 7.504;
- g. Os veículos deverão ser convenientemente identificados acerca de suas funções.

Caso a disposição final do LE seja feita em aterros ou então o lodo seja incinerado, torna-se necessário a apresentação de EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental/Relatório de Impacto Ambiental), estabelecido através da Resolução CONAMA N.1, de 23 de janeiro de 1986. Não se trata de um “mera exigência formal necessária à obtenção do licenciamento”, mas sim de um instrumento da política ambiental para controlar as condições ambientais, avaliando os impactos produzidos por uma determinada atividade (Secretaria do Meio Ambiente, 1991).

Além da resolução que estabelece o EIA/RIMA, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) possui também a Resolução N.5, de 15 de junho de 1988, onde ficam “sujeitas a licenciamento as obras de saneamento para as quais seja possível iden-

³⁶ Aprova o Regulamento para Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos, e dá outras providências.

tificar modificações ambientais significativas”. Nesta resolução fica estabelecido que as obras para a disposição final³⁷ dos sistemas de esgotos sanitários devem ser licenciadas (Brasil, 1995).

Ambas as resoluções citadas acima referem-se ao âmbito nacional. Outras leis e normas nacionais que devem ser analisadas para a disposição final do LE são:

- Constituição Federal, de 5 de outubro de 1988 – Artigos 10, 23 e 200 – tratam da poluição por elementos sólidos/líquido – resíduos
- Lei Federal n. 5.318, de 26 de setembro de 1967 – Institui a Política Nacional de Saneamento e cria o Conselho Nacional de Saneamento
- Lei Federal n. 6.938, de 31 de agosto de 1981 – Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus afins e mecanismos de formulação e aplicação (com redação dada pelas Leis n. 7.804, de 18/07/89 e 8.028, de 12/04/90)
- Lei Federal n. 1.164-E, de 28 de janeiro de 1998 – Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências

Para o Estado de São Paulo, as leis que devem ser levadas em consideração quando da disposição final do LE são (São Paulo, 1995):

- Lei Estadual n. 997, de 31 de maio de 1976 – Dispõe sobre o controle da poluição do Meio Ambiente
- Lei Estadual n. 7.750, de 31 de março de 1992 – Dispõe sobre a Política de Saneamento, e dá outras providências
- Decreto Estadual n. 8.468, de 8 de setembro de 1976 – Aprova o regulamento da Lei n. 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Polui-

³⁷ A resolução não especifica a que disposição final está se referindo, se à disposição final de efluentes ou a do lodo gerado.

ção do Meio Ambiente³⁸

Apesar da falta de uma legislação específica, o LE produzido no Brasil já vem sendo disposto de diversas maneiras: disposição em aterros – Barueri, São Paulo; aplicação na agricultura - Distrito Federal e Paraná. A fim de suprir esta lacuna e garantir que as formas para disposição atualmente utilizadas não venham a prejudicar o meio ambiente e o homem, a SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) juntamente com a CETESB, vêm desenvolvendo uma proposta de legislação específica para a utilização agrícola do LE. Esta proposta está baseada na “503”, até que a SABESP possa reunir “conhecimento local suficiente para a produção de uma norma adequada às características dos lodos retidos em suas próprias ETEs” (Santos et al., 1997).

³⁸ O Inciso VII do artigo 57, estabelece que os “serviços de coleta, transporte e disposição final de lodos ou materiais retidos em unidades de tratamento de água, esgotos ou de resíduo líquido industrial” necessitam obter junto aos órgãos competentes licença para instalação e funcionamento.

Figura 4 – Fluxograma dos passos para aplicação de LE no solo, segundo a EPA.

Fonte: Adaptado de Sieger & Hermann, 1993

7 DEMANDA POTENCIAL E CUSTOS DE APLICAÇÃO DE LE NA AGRICUTLURA EM LIMEIRA

A fim de realizar uma simulação dos custos privados da disposição final do lodo de esgoto na agricultura, o presente estudo apresenta uma planilha de custos para uma das cidades da região: Limeira. Os custos levantados podem ser arcados tanto pelo agricultor como pela estação de tratamento, não cabendo aqui determinar quem deverá arcar com tais custos.

Geograficamente, o município de Limeira está localizado na região Centro-Leste do Estado de São Paulo. As coordenadas geográficas de seu núcleo urbano são 23°33'37'' de latitude S e 47°24'12'' de longitude W, e a sua altitude é de aproximadamente 570 metros acima do nível do mar. O clima da região é bastante ameno, com temperatura média anual de cerca de 20,4°C. As temperaturas médias mensais mínimas e máximas são 15° e 27,2°, respectivamente. O padrão de precipitação pluviométrica é bastante definido com um verão quente e chuvoso e um inverno com temperatura mais baixa e menor precipitação. O volume médio anual de chuvas da região é de aproximadamente 1.400 mm, concentrado no período entre outubro e março.

Esse padrão climático acaba por definir, de maneira acentuada, o calendário agrícola da região. Em geral, na primavera, que no início é quente e chuvosa, são realizados os plantios da maioria das culturas. No caso das culturas perenes adultas, nessa época, iniciam-se os tratos culturais. Com a elevação da temperatura e maior umidade

dos solos, as culturas apresentam um intenso desenvolvimento vegetativo. Assim, nesse período, é realizada a maior parte dos plantios das culturas anuais e os tratos culturais como adubação e controle de pragas, doenças e plantas daninhas. Dependendo da cultura, a colheita é realizada entre o final do verão e durante a estação seca³⁹.

A superfície total de Limeira é de 579 km² (SEADE, 1995). Segundo Pino (1997), em 1995/6 a atividade agropecuária ocupou cerca de 41.722 ha do município. As duas culturas mais importantes no município, cana-de-açúcar e laranja, foram responsáveis, respectivamente, por cerca de 41% e 43% do total da área ocupada pelas principais culturas (Tabela 29).

Em geral, pode-se afirmar que a maior parte da agricultura do município de Limeira e da região é bastante moderna e utiliza intensamente insumos como fertilizantes e defensivos, além da mecanização. Os agricultores estão intimamente inseridos no mercado e dispõem de boa infra-estrutura de transporte, comunicação e de comercialização.

Segundo Pino (1997), além da cana-de-açúcar e laranja, o município possui cerca de 6.392 ha em pastagens e 258 ha em reflorestamento.

7.1 Demanda potencial no setor agropecuário

Com base nos dados mais recentes, em 1996/7 foram determinadas duas estimativas de demanda potencial de lodo de esgoto para o município, levando-se em consideração dois critérios distintos: os riscos de contaminação e um segundo critério, que estima a quantidade de lodo a ser aplicada, com base nos estudos de adubação realizados no Brasil.

³⁹ A descrição acima representa um padrão geral da agricultura regional. Dependendo das características fisiológicas da cultura analisada e das tecnologias adotadas (por ex. irrigação e plasticultura), esse padrão pode ser alterado consideravelmente.

Tabela 29 – Principais culturas no município de Limeira, em 1995/6.

Cultura	Área em ha	%
Laranja	14.841,80	43,17
Cana-de-açúcar	14.191,20	41,28
Tangerina	1.823,00	5,30
Milho	1.743,80	5,07
Braquiária	566,30	1,65
Capim-napier	269,90	0,79
Eucalipto	256,20	0,75
Manga	241,20	0,70
Limão	111,30	0,32
Café	64,00	0,19
Banana	42,60	0,12
Caqui	34,20	0,10
Abacate	32,50	0,09
Alface	27,20	0,08
Macadâmia	27,00	0,08
Mandioca	21,30	0,06
Arroz	18,10	0,05
Maracujá	15,90	0,05
Tangelo	14,90	0,04
Maca	11,40	0,03
Crisântemo	9,30	0,03
Jiló	8,50	0,02
Lima	8,00	0,02
Total	34.380	100,00

Fonte dos dados: Pino, 1997

7.1.1 Critério de risco

O critério de risco adotado no presente trabalho está relacionado com as culturas instaladas nos locais de aplicação do lodo. Isto é, são selecionadas aquelas que, em princípio, apresentam menor risco de contaminação para os agricultores e consumidores. Deve-se salientar, porém, que devido à inexistência de estudos mais detalhados sobre o assunto, a escolha segue critérios subjetivos⁴⁰, baseados em suposições sobre as caracte-

⁴⁰ Estes critérios foram: contato do produto com o lodo, época da adubação *versus* época da colheita e consumo *in natura* ou industrializado.

rísticas morfo-fisiológicas e culturais de colheita e de consumo da cultura. O uso do lodo de esgoto em larga escala, deverá ser feito após o desenvolvimento de estudos nas áreas de conhecimento mencionadas anteriormente neste trabalho.

Dentre as principais culturas presentes no município de Limeira, foram selecionadas algumas que, pelas suas características, podem ser promissoras em termos de assimilação do meio e risco de contaminação de pessoas. A Tabela 30 apresenta as mais interessantes, com suas respectivas áreas. A soma total das áreas dessas culturas é de aproximadamente 14.514 ha. Trata-se de uma área considerável, que poderá receber uma grande quantidade de lodo de esgoto. Em termos percentuais, ela representa cerca de 36% do total de área utilizada com agricultura neste município.

Tabela 30 – Relação das culturas de menor risco, presentes no município de Limeira.

Cultura	Área em ha.
Cana-de-açúcar	14.191,2
Café	64,0
Reflorestamento	258,7
Total	14513,9

Fonte dos dados: Pino, 1997

7.1.2 Critério de estudos realizados

Com base nos estudos de adubação publicados na literatura (já discutidos anteriormente) e nas seguintes estimativas de área (Pino, 1997), é calculada a demanda potencial de lodo de esgoto na agricultura (Tabela 31). Deve-se ressaltar, novamente, que os valores apresentados não são recomendações, na medida em que a maioria dos estudos preocupa-se somente com as respostas das culturas em termos de produtividade, e não consideram os riscos de contaminação. Portanto, as doses contidas na Tabela 31 indicam

as quantidades que poderiam vir a ser utilizadas caso estudos posteriores venham a confirmar seus benefícios e garantir que não causam danos ao ambiente e ao ser humano.

De acordo com a área da cultura no município e as dosagens utilizadas nos estudos de adubação encontrados na literatura, estimou-se as quantidades de lodo potencialmente demandado. Considerando apenas as culturas de cana-de-açúcar e do eucalipto, pode-se verificar que, para uma dosagem média de aplicação de LE na cana (16 t/ha), haveria uma demanda de cerca de 227.315 toneladas de LE (Tabela 31).

Tabela 31 – Demanda potencial de lodo de esgoto em solos agrícolas do município de Limeira, para culturas selecionadas.

Cultura	Dose de Aplicação t/ha	Área ha	Demanda t
Arroz	9	18	163
Café	2	64	128
Cana-de-açúcar	4	14.191	56.765
Cana-de-açúcar	8	14.191	113.530
Cana-de-açúcar	16	14.191	227.059
Cana-de-açúcar	32	14.191	454.118
Cana-de-açúcar	40	14.191	567.648
Eucalipto	20	256	5.124
Milho	4	1.744	6.975
Milho	6	1.744	10.463
Milho	9	1.744	15.694
Milho	63	1.744	109.859
Milho	80	1.744	139.504

Fonte: Tabela 24 e Tabela 29

7.2 Custos de aplicação de LE na agricultura no município de Limeira

A planilha de custos aqui apresentada está baseada na planilha desenvolvida pela Environmental Protection Agency – EPA (Estados Unidos, 1995a)⁴¹. A planilha (Tabela 32) leva em consideração a área necessária a cada ano para diversas aplicações, além de pressupor que a aplicação utiliza veículos próprios e desconsiderar o custo de transporte até a área de aplicação.

Tabela 32 – Custo de capital, manutenção e operação da aplicação de LE na agricultura, no município de Limeira - SP, setembro/98.

Custos	R\$
A. Custo total do capital (B + C + D + E)	454.973,68
B. Custo de aquisição da terra ^a , R\$	0,00
C. Custo da aplicação de calcário, R\$	2.977,24
D. Custo do gradeamento, R\$	15.396,44
E. Custo dos veículos para aplicação, R\$	436.600,00
F. Custo anual total para manutenção e operação, R\$/ano (G + H + I + J)	70.575,15
G. Custo anual de mão-de-obra, R\$/ano	9.435,92
H. Custo anual do diesel, R\$/ano	11.190,24
I. Custo anual de manutenção dos veículos, R\$/ano	13.680,51
J. Custo anual de manutenção da área, R\$/ano	36.268,48

Fonte: Estados Unidos (1995a) – valores calculados pelo autor

a. Pressupõe-se que não existe a necessidade de se adquirir a área.

A metodologia para cálculo leva em consideração uma série de variáveis, descritas a seguir. A primeira delas é a quantidade total de sólidos secos que será aplicada por ano (TDSS). Para calcular esta variável utiliza-se a equação:

⁴¹ Ver pag. 76.

$$TDSS = \frac{(SV \cdot 8,34SS \cdot SSG)365}{2000 \cdot 100} \quad (13)$$

sendo:

SV = volume diário de lodo, em galões por dia

8,34 = densidade da água, em libras/galão

2.000 = fator de conversão libras/t

SS = concentração de sólidos em suspensão, em %

SSG = gravidade específica do lodo

sendo:

$$SSG = 1 / \left\{ \left[(100 - SS) / 100 \right] + \left[SS / (1,42 \cdot 100) \right] \right\}$$

1,02 = gravidade específica dos sólidos do lodo. Este valor varia conforme o tipo de lodo.

No caso específico de Limeira, pressupõe-se que serão produzidas 90 toneladas por dia de lodo de esgoto, contendo uma concentração de sólidos em suspensão de 8%. Isto significa que serão produzidos cerca de 22.000 galões/dia de lodo, ou seja, aproximadamente 2.744 toneladas de sólidos secos por ano.

Uma vez conhecida a quantidade de sólidos secos a ser aplicada, calcula-se a área necessária para a aplicação (SDAR):

$$SDAR = \frac{TDSS}{DSAR} \quad (14)$$

sendo:

$DSAR$ = taxa de aplicação média, em toneladas de sólidos secos/ha/ano

A taxa de aplicação varia conforme diversos fatores discutidos anteriormente (ver Dosagens de aplicação na pag. 69). Pressupondo uma taxa de aplicação média de 25

toneladas/ano de lodo úmido em Limeira, a área necessária para a aplicação de 2.744 toneladas de sólidos secos será de aproximadamente 1.372 ha/ano.

Outra variável a ser calculada é a taxa horária de aplicação do lodo (HSV), calculada por:

$$HSV = \frac{365SV}{DPY \cdot HPD} \quad (15)$$

sendo:

SV = volume diário de lodo, em galões por dia

DPY = período anual de aplicação de lodo, em dias/ano

HPD = período diário de aplicação de lodo, em horas/dia

Pode-se pressupor que o período anual de aplicação, em Limeira, será de 120 dias por ano, 8 horas por dia. Isto leva a uma taxa de aplicação de lodo de cerca de 8.365 galões/hora. É importante salientar que o período anual de aplicação pode variar conforme as condições climáticas, tipo de cultura, tipo de cultivo, etc.; e o período diário de aplicação varia conforme o equipamento utilizado, a qualidade da mão-de-obra, etc.

O próximo passo é calcular a capacidade dos veículos de aplicação (CAP), sua taxa de carregamento (VHRCAP) e o número de veículos necessários (NOV). Pressupõe-se que o lodo de esgoto já foi transportado até o local de aplicação; portanto, os veículos de aplicação apenas distribuem o lodo. Estes veículos⁴² normalmente possuem CAP variando de 1.600 a 4.000 galões. Neste caso pressupõe-se uma CAP de 4.000 galões.

A taxa de carregamento (VHRCAP) é calculada por meio de:

⁴² Uma foto do tipo de veículo utilizado para a aplicação de lodo de esgoto na agricultura pode ser vista no Anexo D.

$$VHRCAP = \frac{60CAP \cdot 0,9}{CT} \quad (16)$$

sendo:

0,9 = fator de eficiência (Estados Unidos, 1995a)

CT = tempo médio de cada viagem, em minutos (Tabela 33)

Trabalhando-se com veículos com CAP de 4.000 galões, tem-se um tempo médio para cada viagem (CT) de aproximadamente 33 minutos. Isto significa que cada veículo terá uma taxa de carregamento de aproximadamente 6.545 galões/hora.

Tabela 33 – Tempo de carregamento, descarregamento e percurso interno, segundo a capacidade (galões) do veículo de aplicação e LE.

Capacidade do veículo (CAP)	LT – tempo de carregamento	ULT – tempo de descarre- gamento	TT – tempo de percurso inter- no	CT –tempo médio de cada viagem
galões	minutos			
1.600	6	8	5	25
2.200	7	9	5	28
3.200	8	10	5	31
4.000	9	11	5	33

Fonte: Estados Unidos, 1995a

Para se calcular o número de veículos necessários (NOV) para se aplicar o lodo de esgoto, divide-se taxa horária de aplicação do lodo (HSV) pela taxa de carregamento (VHRCAP):

$$NOV = \frac{HSV}{VHRCAP} \quad (17)$$

Utilizando-se veículos com CAP de 4.000 galões, tem-se uma taxa de carregamento de aproximadamente 6.545 galões/hora (Equação 16). No caso específico de Li-

meira, observa-se uma taxa horária de aplicação de lodo de em 8.365 galões/hora (Equação 15), sendo, portanto necessários cerca de 1,3 veículos, ou seja, 2 veículos para a aplicação agrícola de lodo de esgoto.

Uma vez conhecido o número de veículos necessários para a aplicação do lodo, as próximas variáveis a serem calculadas são: o número de horas de trabalho necessárias e o consumo anual de diesel.

O número de horas de trabalho (L) é calculado através da equação abaixo:

$$L = \frac{8NOV \cdot DPY}{0,7} \quad (18)$$

sendo:

DPY = período anual de aplicação de lodo, em dias/ano

Neste caso, pressupõe-se que existam 120 dias úteis por ano para a aplicação e exista um fator de eficiência de 0,7 (Estados Unidos, 1995a). Sendo assim, o número de horas de trabalho necessárias para a aplicação agrícola do lodo será de cerca de 2.743 horas/ano.

Para o cálculo do consumo anual de diesel a equação a ser utilizada é:

$$FU = \frac{HSV \cdot HPD \cdot DPY \cdot DFRCAP}{VHRCAP} \quad (19)$$

sendo:

HPD - período diário de aplicação de lodo, em horas/dia

DPY = período anual de aplicação de lodo, em dias/ano

$DFRCAP$ = taxa de consumo de diesel, em galões/hora

Pressupondo-se uma taxa de consumo ($DFRCAP$) de 6 galões/hora, o consumo anual de diesel será de aproximadamente 7.362 galões.

A metodologia norte-americana recomenda que haja uma área adicional à SDAR (Equação 14), a fim de garantir, por exemplo, espaço para armazenamento local, possibilidades de alterações no plantio e/ou dosagem de aplicação, etc. O valor desta área varia conforme o projeto. Segundo Estados Unidos (1995a), pressupõe-se que 40% da área necessária para a aplicação será utilizada para esses outros fins. Portanto, o total de área requerida para aplicação de lodo (TLAR) será aproximadamente 1.921 ha/ano ($1.372 \text{ ha} + 0,40 \cdot 1.372 \text{ ha}$).

Outra recomendação norte-americana é que a aplicação de lodo só seja feita em solos com pH por volta de 6,5. Análises de solo são necessárias para se determinar a necessidade de calcário da área. Pressupõe-se que cerca de 50% da área destinada à aplicação, terá que ter o pH corrigido (Estados Unidos, 1995a), o que significa que 686 ha ($0,50 \cdot 1.372 \text{ ha}$), deverão receber calagem.

Novamente, seguindo a recomendação norte-americana, sugere-se que haja um gradeamento leve para que o lodo incorpore melhor ao solo, evitando-se com isto riscos de deslocamento superficiais. Dependendo do local, este gradeamento terá que ser feito na área toda. Este exemplo pressupõe que cerca de 30% da área destinada à aplicação do lodo terá que receber este gradeamento, ou seja, aproximadamente 412 ha ($0,30 \cdot 1.372 \text{ ha}$).

De posse destas informações, é possível iniciar os cálculos de custo propriamente dito. O primeiro deles refere-se à aquisição da terra (COSTLAND). Para o caso de Limeira, pressupõe-se não existir a necessidade de se adquirir a terra, ou seja, a aplicação será feita em áreas de terceiros; portanto, este custo é zero.

O próximo custo a ser calculado é o da aplicação de calcário nas áreas que neces-

sitam de ajuste de pH (COSTPHT). Esse custo foi estimado, segundo CEPEA⁴³, em R\$ 4,34 por hectare, levando em conta apenas o custo do conjunto mecanizado: trator 75CV + distribuidor de adubos tipo vicon 500 kg. Isto leva a um custo total de cerca de R\$ 2.977,24 ($4,34 \times 686$).

Da mesma forma calcula-se o custo anual do gradeamento leve (COSTWE). Este custo, assim como o custo de ajuste do pH, depende de uma série de fatores. Em Limeira o valor estimado, segundo CEPEA³⁹ foi de R\$ 37,37 por hectare e leva em consideração o custo do conjunto mecanizado: trator 75CV + grade aradora 12x28. Em função disto o custo total de gradeamento leve é de aproximadamente R\$ 15.396,44 ($37,37 \times 412$).

Como dito anteriormente, esta metodologia pressupõe que a aplicação do lodo seja realizada através de veículos próprios; portanto, torna-se necessário calcular o custo de aquisição destes veículos (COSTMAV). Segundo Estados Unidos (1995a), o custo da aquisição de cada veículo é de US\$ 185.000,00. Como esse valor representa o custo do veículo nos Estados Unidos, ainda teriam que ser incorporados os custos de importação. Pressupondo uma taxa de câmbio de R\$ 1,18/US\$ 1,00⁴⁴, tem-se que serão necessários R\$ 436.600,00 para a aquisição dos dois veículos necessários para a aplicação agrícola de lodo em Limeira.

O custo da mão-de-obra necessária para operar estes veículos e realizar a aplicação foi estimada em 2.743 horas/ano (Equação 18). Segundo CEPEA⁴³ o custo horário da mão-de-obra em Limeira foi estimado em R\$ 3,44, supondo que o operador do veículo receba 4 salários mínimos. Portanto, o custo anual da mão-de-obra (COSTLB) será de R\$ 9.435,92.

⁴³ CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Planilhas de custo, setembro/1998.

⁴⁴ Taxa média do dólar comercial no mês de setembro de 1998. Fonte: CEPEA, setembro/1998.

O consumo anual de diesel foi estimado em aproximadamente 7.362 galões (Equação 19). Pressupondo um custo por galão de R\$ 1,52 (setembro/1998), o custo anual de diesel (COSTDSL) será de R\$ 11.190,24.

Já o custo de manutenção dos veículos é calculado através da seguinte equação:

$$VMC = \frac{HSV \cdot HPD \cdot DPY \cdot MCSTCAP}{VHRCAP} \quad (20)$$

sendo:

MCSTCAP = custo de manutenção por hora de operação, em R\$/hora

Pressupondo-se um custo de manutenção (*MCSTCAP*) de US\$ 9,45⁴⁵ (Estados Unidos, 1995a), o custo de manutenção (*VMC*) será de aproximadamente R\$ 13.680,51 por ano.

Por fim, considera-se o custo anual de manutenção da área (*SMC*), estimado em US\$ 16,00/ha (Estados Unidos, 1995a)⁴⁵. Este custo cobre as despesas de monitoramento, coleta e armazenamento de dados, etc. Para Limeira, portanto, o custo total anual de manutenção da área (1.921 ha) foi calculado como sendo de R\$ 36.268,48 por ano.

Somando-se os custos de capital (*COSTLAND*, *COSTPHT*, *COSTEW* e *COSTMAV*) tem-se o total de R\$ 454.973,68. Pode-se observar que no custo total do capital a aquisição de veículos responde por cerca de 96% do valor encontrado. Consequentemente, é de se esperar que alterações nos custos e na utilização desta variável irão refletir de forma decisiva nos custos totais.

Outras variáveis importantes para a determinação dos custos totais são: o volume diário de lodo produzido, a concentração de sólidos em suspensão e a taxa de aplica-

⁴⁵ Transformado pela taxa de câmbio de R\$ 1,18/US\$ 1,00.

ção média. Se a produção de lodo dobrar, *ceteribus paribus*, os custos de capital e manutenção passam respectivamente para: R\$ 691.609,99 e R\$ 136.413,61, em função da necessidade da aquisição de mais um veículo de aplicação. Se a concentração de sólidos em suspensão passar para 16% (dobrar), *ceteribus paribus*⁴⁶, os custos de capital e manutenção passam respectivamente para: R\$ 474.242,32 e R\$ 108.629,80, em função da necessidade de uma maior área (2.812 ha contra 1.372 ha). É importante salientar que a área não será uma restrição atuante conforme pode ser observado nas tabelas 30 e 31. Se a taxa de aplicação média dobrar, *ceteribus paribus*, (passar de 25 t/ha para 50 t/ha) os custos de capital e manutenção serão respectivamente de: R\$ 445.786,84 e R\$ 52.436,84.

O custo por tonelada de sólidos secos é de R\$ 191,53 (R\$ 454.973,68 + R\$ 70.575,15 / 2.744 toneladas de sólidos secos). Este custo está bem abaixo dos custos para disposição em aterros (R\$ 46,15 por tonelada de lodo úmido, pag. 65) e dos custos de incineração (R\$ 1,00 a R\$ 2,00 por kg de resíduo, pag. 66).

Comparando o custo privado de Limeira com os custos de cidades norte-americanas que produzem, aproximadamente, o mesmo volume de sólidos secos (Tabela 34), observa-se que ele encontra-se abaixo dos custos norte-americanos. Isto pode ser explicado devido ao fato de que nos Estados Unidos os custos privados levam em consideração os custos de monitoramento, que não foram incluídos na planilha de Limeira.

⁴⁶ Mantendo-se constante a taxa de aplicação de 2 toneladas de lodo seco por ha.

Tabela 34 – Custos privados da disposição do LE, em cidades norte-americanas e em Limeira - SP.

Cidade	Toneladas de sólidos secos	US\$/tonelada de sólido seco
Limeira - SP	2.744	162,31 ⁴⁷
Springfield - Oregon	2.700	181,00
Salem - Oregon	2.510	225,00

Fonte dos dados: Borgatti & Psaris, 1994

7.3 Desenvolvimento de mercado

Como foi visto anteriormente, o LE possui características favoráveis para a sua utilização na agricultura, adquirindo valor de uso para os agricultores. As empresas de esgotamento sanitário, portanto, sejam elas públicas ou privadas, podem considerar o LE como um subproduto de suas atividades. Portanto, torna-se necessário criar e desenvolver um mercado para este subproduto.

Os E.U.A. podem ser considerados um dos países pioneiros no desenvolvimento de mercado para este tipo de resíduo. Programas educacionais, campos de demonstração, dias de campo, envolvimento das universidades e agências governamentais de pesquisa, palestras, monitoramento e testes foram algumas das ferramentas utilizadas para desenvolver um mercado agrícola para o LE (Faust & Oberst, 1996; Stark, 1993; Sopper, 1993; Walker, 1986; Logsdon, 1992; Forster et al., 1981; Forster et al., 1976).

O desenvolvimento de um mercado agrícola para o LE é importante não apenas para garantir uma disposição final adequada do resíduo, mas também para: sinalizar aos produtores (ETEs) e consumidores (agricultores) a oferta e demanda de LE; minimizar a

⁴⁷ Transformado pela taxa de câmbio de R\$ 1,18/US\$ 1,00.

necessidade de intervenção governamental na disposição final do LE⁴⁸; permitir o desenvolvimento econômico; e promover a conservação dos recursos (Sutherland, 1993).

Uma vez estabelecido o mercado, é preciso estar atento às atitudes oportunistas que os agentes possam tomar. Forster et al. (1976) sugere contratos entre os agentes, que incluam: a identificação dos agentes e do local de aplicação, a determinação da taxa e da forma de aplicação, a qualidade mínima necessária do LE, restrições quanto à época e às culturas, a determinação da área a ser utilizada, mecanismos de quebra de contrato e mecanismos de arbítrio caso haja desacordo entre as partes.

⁴⁸ Existindo um mercado desenvolvido para o LE, a intervenção governamental fica restrita à criação e fiscalização de regulamentações que garantam a qualidade dos produtos que receberam o LE.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com o desenvolvimento e crescimento do país, espera-se que o serviço de esgotamento sanitário cresça, atingindo uma maior parcela da população. Somente na região das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, espera-se que, em 2020, 5,6 milhões de habitantes sejam atendidos pelos sistemas de esgotamento. A carga total coletada será de aproximadamente 304 t DBO/dia que, se submetida a tratamento com eficiência média de 90%, será reduzida para 30 t DBO/dia (PROJECTUS, 1997). Em termos de volume, estima-se que no ano 2020, serão tratados cerca de 17.284 l/s de esgoto.

As melhorias ambientais a serem alcançadas com o esgotamento sanitário serão muito importantes para o bem-estar da população. Porém, o presente estudo conclui que se o resíduo biológico decorrente do tratamento de esgoto (lodo de esgoto) não for devidamente tratado e disposto, haverá o risco do surgimento de um novo problema ambiental, com prejuízos ao meio ambiente e ao homem.

O lodo de esgoto possui características físico-químicas específicas que exigem uma disposição controlada, a fim de se minimizar os riscos de contaminação. De acordo com a revisão de literatura do presente estudo, os principais contaminantes que o lodo de esgoto pode vir a possuir são os metais pesados e patógenos. Infelizmente, no Brasil são poucos os estudos que investigaram, até o presente momento, as características e os contaminantes dos nossos lodos. É importante ressaltar que cada cidade apresenta condições sócio-econômicas e de desenvolvimento bastante diversas. Consequentemente, é de se esperar que os lodos produzidos nas diversas cidades brasileiras apresentem uma va-

riabilidade bastante grande em relação ao teor de nutrientes e contaminantes. De acordo com o tipo de lodo gerado, determinadas alternativas de disposição serão mais viáveis em relação a outras. Além do mais, com a caracterização do lodo de esgoto é possível identificar quais são os problemas ambientais e de saúde pública que a cidade possui, tais como lançamento de metais pesados no esgoto, infestações parasitárias, etc.

A fim de garantir a disposição adequada do LE no Brasil, várias linhas de pesquisa tornam-se necessárias. O presente estudo sugere algumas delas. A primeira seria sobre a caracterização físico-química do lodo de esgoto, municípios⁴⁹. É importante salientar que esta caracterização deve ser de responsabilidade das estações de tratamento de esgotos (públicas ou privadas) e o governo tem o papel de estabelecer padrões específicos para o lodo de esgoto, garantindo a qualidade deste material.

Em outros países do mundo, existe uma preocupação muito grande a respeito da caracterização e disposição adequada do lodo de esgoto, em especial nos Estados Unidos e em vários países da Europa. Estes países desenvolveram e continuam a desenvolver pesquisas a fim de estabelecer normas e parâmetros que permitam a disposição segura e econômica do lodo de esgoto. No Brasil, ainda não existe uma legislação específica, apesar dos trabalhos já desenvolvidos pela CAESB em Brasília, SANEPAR no Paraná e da preocupação da SABESP em São Paulo. Conclui-se portanto, que torna-se fundamental a elaboração de legislações específicas para as diversas condições brasileiras.

Entre as alternativas que são citadas na literatura, estão: aplicação em áreas degradadas, disposição em aterros sanitários, incineração, disposição no mar, aplicação na agricultura e aplicação em florestas. Todas essas alternativas possuem vantagens e riscos potenciais. O presente estudo mostrou quais são algumas destas vantagens e riscos potenciais.

Quanto às diversas alternativas de disposição do LE, seria desejável que o Brasil estabelecesse linhas de pesquisas específicas para cada alternativa. Por exemplo, no caso da utilização agrícola do LE, haveria a necessidade de realizar projetos multidisciplinares, que iriam abordar todos os aspectos técnico-econômicos envolvidos. No Paraná, a SANEPAR já desenvolveu um projeto deste tipo. Outros estados brasileiros precisam iniciar os seus projetos, baseando-se na experiência paranaense e também nos exemplos internacionais, como por exemplo nos EUA. Neste país pesquisa-se a utilização agrícola do lodo de esgoto há mais de 30 anos.

É importante lembrar que as características edafo-climáticas e de desenvolvimento das cidades brasileiras são bastante distintas dos exemplos internacionais. Porém, a comparação entre cidades brasileiras com as de outros países é importante para nortear nossas pesquisas.

Outra linha de pesquisa que precisa ser implementada no Brasil, refere-se ao comportamento de metais pesados e de patógenos no solo. Os dados apresentados nesta dissertação mostram algumas considerações que vários países fizeram a respeito deste tópico. Porém, o Brasil, apresenta condições edafo-climáticas específicas, além disso, os solos brasileiros são bastante distintos entre si. Portanto, o comportamento de metais pesados e de patógenos, em solos brasileiros é diferente do encontrado em solos estrangeiros. Analisar nossos solos é condição fundamental para esta pesquisa. A partir disto, a disposição do lodo será melhor aproveitada; a agricultura e a saúde pública serão beneficiadas.

No caso específico da disposição agrícola do lodo de esgoto, seria interessante que fossem desenvolvidas no Brasil linhas de pesquisa sobre "adubação orgânica". A utilização eficaz do lodo de esgoto e de outros resíduos envolve não apenas aspectos

⁴⁹ Pesquisas sobre novas tecnologias para saneamento básico também deveriam ser priorizadas, em especial aquelas que gerariam uma menor quantidade de LE.

agronômicos e econômicos como também o nível de cultura dos agricultores, a maneira como eles lidam com a terra, seus valores pessoais, etc.

Atualmente, existe uma tendência mundial em se priorizar as alternativas que promovam a reciclagem do lodo, como a aplicação em áreas degradadas, na agricultura e em florestas. Tomando como exemplo a cidade de Limeira, determinou-se o neste estudo, o custo privado da aplicação agrícola do lodo de esgoto. Baseando-se em um modelo de aplicação agrícola norte-americano (Estados Unidos, 1995a), o custo total de capital para a disposição de 2.744 toneladas de sólidos secos por ano será de R\$ 454.973,68, enquanto que o custo de manutenção e operação será de R\$ 70.575,15 por ano.

O custo por tonelada de sólidos secos é de R\$ 191,53 ($R\$ 454.973,68 + R\$ 70.575,15 / 2.744$ toneladas de sólidos secos). Este custo está bem abaixo dos custos para disposição em aterros (R\$ 46,15 por tonelada de lodo úmido, pag. 65) e dos custos de incineração (R\$ 1,00 a R\$ 2,00 por kg de resíduo, pag. 66), mostrando-se com isto maior viabilidade econômica da disposição agrícola em relação às estas alternativas. Porém, esta comparação deve ser feita com certa cautela, uma vez que, algumas variáveis não foram levadas em consideração, como por exemplo: o custo de transporte. Além do mais, seria necessário a elaboração de planilhas de custos privados para aplicação de lodo de esgoto em florestas e em áreas degradadas, para que todas as alternativas possíveis possam ser comparadas. A elaboração destas novas planilhas e o cálculo correto dos custos de aterros e incineração, ficam como sugestões para futuros estudos.

A metodologia apresentada para a aplicação agrícola do LE, mostrou-se válida, porém precisa ser adaptada às condições brasileiras, pois conforme já mencionado, as condições edafo-climáticas dos solos norte-americanos são bastante distintas das nossas. Além disso, não existem no Brasil veículos próprios para a aplicação do lodo.

Um outro aspecto da aplicação do lodo de esgoto na agricultura que tem que ser avaliado é o preço da terra. Foi pressuposto que o custo da aquisição da terra seria zero,

ou seja, a aplicação seria feita em áreas sem nenhum custo referente ao arrendamento. Esta alternativa somente será viável, se os agricultores obtiverem ganhos de produtividade com a aplicação do lodo e a relação fator-produto for favorável (Capítulo 2). Com isto, eles terão interesse em receber o lodo de esgoto e não cobrarão pela utilização de suas terras. Caso não obtenham ganhos de produtividade ou a relação fator-produto não seja favorável, os agricultores poderão arrendar parte de suas terras às companhias de saneamento para que estas possam dispor o lodo de esgoto. Outra possibilidade é que as companhias de saneamento venham a adquirir áreas, somente para este fim, ficando a agricultura uma atividade secundária da fazenda. Nos Estados Unidos, diversas companhias de saneamento possuem fazendas próprias para a aplicação de lodo de esgoto (Borgatti & Psaris, 1994).

É interessante observar que os custos privados calculados neste estudo podem recair tanto sobre as companhias de saneamento como sobre os agricultores, dependendo de quem tem maior interesse na sua aplicação. Primeiramente, os custos serão das companhias de saneamento, pois é delas a responsabilidade de dispor adequadamente o lodo de esgoto. Também os agricultores ou companhias especializadas poderiam assumir estes custos, desde que haja a viabilidade econômica para isto.

Através deste estudo, ficou claro, que o sucesso de um plano de disposição do lodo de esgoto, seja na agricultura como em qualquer outra alternativa, não depende somente do seu adequado dimensionamento técnico, científico e econômico. Embora estas condições sejam extremamente importantes, existe uma série de outras variáveis que, direta ou indiretamente, afetam o seu êxito.

Uma destas variáveis é o desenvolvimento, desde o início, de uma “boa imagem” (marketing) para o lodo de esgoto. Uma vez maculado, fica difícil e custoso recuperar o prestígio, como mostra a experiência internacional. A participação de todos os agentes envolvidos (empresas de saneamento, agricultores, governo, entidades representando consumidores, universidades, entre outros) será, portanto, de fundamental importância

para o sucesso de planos de disposição do lodo de esgoto, específicos para cada cidade. O governo deve desempenhar um papel fundamental no delineamento de tais planos, em especial nas cidades onde a privatização do setor de saneamento ocorreu ou ainda vai acontecer.

Neste estudo, mostrou-se apenas os aspectos mais importantes que devem ser levados em consideração na elaboração de tais planos, em especial os custos privados de algumas das alternativas existentes. Porém, existem outras variáveis e questões que ainda precisam ser estudadas, entre elas, a distribuição dos custos, ou seja, quem irá arcar com as despesas da disposição (agricultor ou companhia de saneamento)? Haveria a possibilidade de se estabelecer um preço para o lodo de esgoto? (Capítulo 2). Como funcionaria este mercado? No caso da utilização agrícola e/ou florestal, quais são os retornos econômicos observados nas diferentes culturas e dosagens? Quais seriam as implicações econômicas e técnicas com a adoção de uma legislação brasileira baseada na “503” norte-americana?

Todas estas questões ainda precisam ser respondidas e, para isto, tornam-se necessários projetos multi-disciplinares envolvendo diversos profissionais: engenheiros agrônomos, florestais, sanitários, químicos, economistas, biólogos. O governo deve desempenhar um papel fundamental no estabelecimento de padrões ambientais para as diversas alternativas e também como órgão de fiscalização. Para tanto, torna-se necessário a sua participação em todas as linhas de pesquisa acima mencionadas. Caso contrário, poderíamos correr o risco de utilizar padrões “importados”, totalmente desvinculados da nossa realidade, com o risco de graves consequências para a agricultura e saúde pública.

Pode-se concluir que cada cidade precisa elaborar seu próprio plano de disposição final de lodo de esgoto. É preciso levar em consideração as condições de seu sistema de saneamento ambiental, as características físico-químicas do lodo produzido, o volume

gerado⁵⁰, etc. Deve-se observar também quais são as alternativas de disposição que existem na região e quais são os outros “resíduos” que a cidade gera. É importante lembrar que o lodo poderá disputar com estes outros resíduos os recursos e/ou alternativas de disposição.

Também como conclusão deste estudo, sugere-se que alternativas que promovam a reciclagem do lodo de esgoto sejam incentivadas. Neste caso a utilização do lodo na agricultura e/ou em florestas. Para tanto, é preciso avaliar bem todos os aspectos envolvidos como: as características do solo, formas de cultivos, tipos de culturas, o uso de adubos orgânicos e finalmente a receptividade por parte dos agricultores.

Assim, a exemplo do que foi feito em Limeira, seria necessário o cálculo não só dos custos privados, mas também dos custos sociais para cada uma das cidades das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. Os aspectos econômicos precisam ser abordados a fim de garantir que a sociedade não pague a mais pela disposição do LE. Para isto, sugere-se a utilização do referencial teórico apresentado no Capítulo 2. Finalmente, somente com a determinação correta de todos os benefícios e custos sociais de cada uma das alternativas nas diferentes cidades e/ou regiões brasileiras, é que será possível escolher a melhor, do ponto de vista social.

⁵⁰ Ver Anexo A.

ANEXOS

Anexo A - Projeções das Vazões e Cargas Poluidoras Afluentes às ETES.

Município	Esgoto a ser Tratado											
	Vazões (l/s)						Carga Orgânica (kgdbó/dia)					
	1996	2000	2006 -	2010	2015	2020	1996	2000	2006	2010	2015	2020
ÁGUAS DE SÃO PEDRO	0	8	12	15	15	16	0	104	156	192	199	206
AMERICANA	203	497	597	639	680	715	3185	8700	9341	10004	10645	11199
AMPARO / SEDE	0	101	116	124	131	139	0	2246	2437	2606	2770	2920
AMPARO / ARCADAS	0	5	6	7	7	8	0	103	112	119	127	134
AMPARO / TRÊS PONTES	0	1	2	2	2	3	0	9	27	34	36	38
ANALÂNDIA	0	3	5	6	7	8	0	63	102	134	146	157
ARTHUR NOGUEIRA	51	57	61	67	72	78	677	768	855	937	1015	1091
ATIBAIA	0	133	296	388	425	460	0	5080	5776	6431	7047	7628
BOM JESUS DOS PERDÕES	0	21	29	31	33	34	0	466	595	642	679	711
BRAGANÇA PAULISTA	0	125	222	281	298	315	0	5643	6184	6665	7053	7476
CABREUVA / BOM FIM DO BOM JESUS	0	1	4	5	6	7	0	21	78	112	134	152
CABREUVA / JACARÉ	8	27	54	66	79	90	160	523	1065	1304	1557	1769
CAMANDUCAIA / SEDE (MG)	0	7	28	41	47	53	0	172	623	936	1064	1205
CAMANDUCAIA / MONTE VERDE(MG)	0	4	14	21	24	27	0	63	228	343	390	441
CAMPINAS	0	1525	2463	3185	3467	3612	0	45059	49087	53946	58733	61182
CAMPO LIMPO PAULISTA	0	91	202	290	341	392	0	3336	4131	5041	5943	6820
CAPIVARI	0	62	100	129	140	148	0	1055	1703	2202	2367	2525
CHARQUEADA / SEDE	5	11	17	22	22	22	90	206	326	403	415	420
CHARQUEADA / PARAISOLÂNDIA	0	3	7	8	9	9	0	69	153	190	195	198
CORDEIROPOLIS	0	27	43	56	60	64	0	434	699	909	984	1045
CORUMBATAI	0	3	5	6	7	7	0	44	68	86	93	99
COSMÓPOLIS	29	73	122	160	176	191	527	1314	2211	2695	3186	3456
ELIAS FAUSTO / SEDE	1	9	19	26	29	31	17	210	397	535	595	655
ELIAS FAUSTO / CARDEAL	1	3	5	6	6	7	27	65	108	123	137	151
EXTREMA (MG)	0	20	37	56	61	69	0	512	925	1389	1516	1692
HOLAMBRA	0	20	23	27	33	39	0	290	357	426	509	608
HORTOLÂNDIA	0	140	361	421	480	539	0	3136	7531	8780	10020	11256
INDAIATUBA	0	258	418	563	635	702	0	3900	6494	8747	9852	10905
IPÊUNA	6	7	8	9	10	11	114	138	162	184	204	221
IRACEMÁPOLIS	0	51	58	64	70	75	0	783	888	984	1072	1147
ITAPEVA (MG)	0	6	12	19	20	22	0	140	261	415	439	487
ITATIBA	0	82	142	182	195	208	0	3298	3636	3946	4245	4508
ITUPEVA	0	20	53	74	84	94	0	444	1099	1543	1760	1968
JAGUARIUNA	0	100	120	138	155	171	0	1478	1784	2046	2298	2539
JARINU	7	18	32	36	39	42	91	247	445	500	545	583
JOANÓPOLIS	10	14	19	19	19	19	255	337	396	396	395	392
JUNDIAÍ	0	556	851	1089	1136	1200	0	14791	15975	17064	18129	19152
LIMEIRA	75	468	766	1018	1131	1239	1260	7885	12908	17161	19069	20895
LOUVEIRA	0	60	79	92	105	116	0	1046	1257	1459	1668	1835
MOMBUCA	2	3	4	5	5	5	44	66	89	94	96	96
MONTE ALEGRE DO SUL / SEDE	0	5	9	10	10	11	0	83	145	159	172	182
MONTE ALEGRE DO SUL / MOSTARDAS	0	1	2	2	3	3	0	33	48	50	54	57
MONTE MOR	0	33	81	113	132	147	0	679	1688	2361	2754	3066
MORUNGABA	15	18	21	23	27	29	356	402	447	486	569	604
NAZARÉ PAULISTA	5	9	16	19	22	25	125	241	406	491	568	642
NOVA ODESSA	0	136	156	176	194	210	0	2137	2448	2765	3045	3298
PAULÍNIA	0	57	113	150	167	183	0	2014	2772	3137	3486	3812
PEDRA BELA	0	1	3	3	4	4	0	26	54	72	80	88
PEDREIRA	0	84	99	103	106	109	0	1290	1516	1571	1621	1670
PINHALZINHO	6	9	14	15	17	19	138	206	287	322	355	386
PIRACAJÁ	0	22	47	59	62	63	0	558	1065	1338	1393	1431
PIRACICABA / SEDE, STA TEREZ. PIRAC.	0	937	1070	1158	1228	1284	29	16235	17785	19247	20412	21348
PIRACICABA/ARTEMIS	0	4	7	9	10	10	0	98	157	200	212	222
PIRACICABA/GUAMUIM	1	1	1	2	2	2	21	26	30	33	35	36
PIRACICABA/TUPI	0	2	4	5	6	6	0	57	88	112	119	124
RAFARD	0	25	28	31	34	37	0	478	541	603	656	704
RIO CLARO / SEDE	3	336	494	663	711	757	52	8459	8788	10023	10750	11445
RIO CLARO/AJAPI	4	5	5	6	6	7	66	73	76	87	93	99
RIO CLARO/ASSISTÊNCIA	2	2	2	3	3	3	32	35	37	42	45	48
RIO DAS PEDRAS	0	43	69	89	97	103	0	729	1157	1500	1621	1727
SALTINHO	9	11	14	15	16	17	227	255	285	314	339	361
SALTO	0	207	363	502	573	632	0	4516	5044	5341	5519	5699
SANTA BÁRBARA d'OESTE	0	301	499	674	729	788	0	6286	10423	14078	15221	16035
SANTA GERTRUDES	9	20	30	38	40	41	175	388	589	735	770	801
SANTA MARIA DA SERRA	0	10	14	18	20	22	0	186	249	330	366	396
SANTO ANTÔNIO DA POSSE	0	28	49	55	61	66	0	467	820	920	1017	1105
SÃO PEDRO	0	30	49	63	67	71	0	546	902	1161	1241	1312
SUMARÉ	2	294	545	724	801	871	41	10697	12433	14036	15515	16883
TOLEDO	0	2	4	5	5	5	0	50	81	107	112	118
TUIUTI	0	2	5	7	7	7	0	64	113	142	149	155
VALINHOS	0	109	194	250	266	280	0	3767	4211	4619	4916	5173
VARGEM	0	2	5	6	6	7	0	46	102	131	138	140
VÁRZEA PAULISTA	0	85	191	247	269	289	0	3445	6024	5545	6022	6478
VINHEDO	0	115	156	174	193	210	0	1782	2409	2694	2981	3256
TOTAL	455	7568	11769	14792	16155	17284	7707	180594	223887	259674	283695	303665

Fonte: PROJECTUS, 1997

Anexo B - Planilhas de custos para a aplicação de LE – Agricultura, Florestas e Áreas Degradadas, Estados Unidos, 1995.

Custo de Aplicação de LE na agricultura	Valor
Cálculo da quantidade de sólidos secos aplicados por ano	
TDSS – Sólidos secos aplicados t/ano	8.126,14
$TDSS = [(SV)(8,34)(SS)(SSG)(365)]/(2000)(100)$	
SV – Volume diário de lodo, galões por dia	131.894,48
SS – Concentração de sólidos em suspensão, %	4
SSG – Gravidade específica do lodo	1,01
$SSG = 1/[(100-SS)/100+(SS)/(1.42)(100)]$	
Área necessária para aplicação	
SDAR – área necessária para aplicação, ac	2.031,53
$SDAR = (TDSS)/(DSAR)$	
DSAR – Taxa de aplicação média, t. de sólidos secos/ac/ano	4
Taxa de aplicação de lodo por hora	
HSV – Taxa de aplicação de lodo por hora, galões/hora	50.147,38
$HSV = (SV)(365)/(DPY)(HPD)$	
DPY – Período anual de aplicação de lodo, dias/ano	120
HPD – Período diário de aplicação de lodo, h/dia	8
Capacidade dos veículos de aplicação	
Capacidade (CAP) dos veículos de aplicação, galões	3.960
Número (NOV) de veículos necessários	8
$NOV = HSV/VHRCAP$	
CT – Tempo médio de cada viagem, min	33
VHRCAP - Taxa de carregamento de cada veículo, galões/hora	6.480,00
$VHRCAP = [(CAP)(60)(0.9)]/(CT)$	
Total de área requerida	
TLAR – Total de área requerida para aplicação na agricultura, ac/ano	2.844,15
$TLAR = (1 + FWWAB)(SDAR)$	
FWWAB - Fração de área utilizada para outros fins que não a aplicação de lodo	0,4
Aplicação de calcário para ajustar o pH para o mínimo de 6.5	
TLAPH - Total de área que necessita calcário, ac	1.015,77
$TLAPH = (FRPH)(SDAR)$	
FRPH – Fração da área que requer aplicação de calcário a fim de ajustar o pH para 6.5	0,5
Gradeamento	
TLARLG - Total de área que necessita de gradeamento leve, ac	609,46
$TLARLG = (FRLG)(SDAR)$	
FRLG – Fração da área que necessita de gradeamento leve	0,3
Mão de obra necessária por ano	
L - Mão de obra necessária por ano, horas/ano	10.971,43
$L = 8(NO)(DPY)/0,7$	

Custo de Aplicação de LE na agricultura	Valor
Consumo anual de diesel	
FU – Consumo anual de diesel, galões/ano	44.580,80
$FU = (HSV)(HPD)(DPY)(DFRCAP)/(VHRCAP)$	
DFRCAP - Taxa de consumo de diesel (galões/hora)	6
Custo da área	
COSTLAND - Custo da área, US\$	0
$COSTLAN = (TLAR)(LANDCST)$	
LANDCST - Preço da terra, US\$/ac	0
Custo da aplicação de calcário para ajustar o pH	
COSTPHT - Custo total da aplicação de calcário, US\$	83.305,63
$COSTPHT = (TLAPH)(PHCST)$	
PHCST - Custo da aplicação de calcário, US\$/ac	82,01
Custo anual de gradeamento	
COSTEW - Custo de gradeamento, US\$	828.267,79
$COSTEW = (TLARLG)(LGEWCST)$	
LGEWCST - Custo de gradeamento leve, US\$/ac	1.359,02
Custo dos veículos para aplicação de LE	
COSTMAV - Custo dos veículos para aplicação, US\$	1.480.000,00
$COSTMAV = (NOV)(COSTPV)(MSECI)/990.8$	
COSTPV - Custo para a aquisição de cada veículo, US\$	185.000,00
MSECI - Índice de custo para veículos (Marshall and Swift) vigente na época do cálculo	990,8
Custo anual da mão de obra	
COSTLB - Custo anual da mão de obra, US\$/ano	252.013,71
$COSTLB = (L)(COSTL)$	
COSTL - Custo horário da mão de obra, US\$/hora	22,97
Custo anual do diesel	
COSTDSL - Custo anual do diesel, US\$/ano	49.038,88
$COSTDSL = (FU)(COSTDF)$	
COSTDF - Custo por galão do diesel, US\$/galão	1,10
Custo anual de manutenção dos veículos de aplicação	
VMC - Custo anual de manutenção dos veículos de aplicação, US\$/ano	70.206,33
$VMC = ((HSV)(HPD)(DPY)(MCSTCAP))/(VHRCAP)MSECI/990.8$	
MCSTCAP - Custo de manutenção por hora de operação, US\$/hora	9,45
Custo anual de manutenção da área	
SMC - Custo anual de manutenção da área, US\$/ano	45.506,38
$SMC = [(TLAR)(16)]ENRCCI/5445,83$	
ENRCCI - Índice de custo (Engineering News Record Construction) vigente na época do cálculo	5.445,83
Custo total do capital da aplicação de LE na agricultura	
TBCC - Custo total do capital	
$TBCC = COSTLAND + COSTPHT + COSTEW + COSTMAV$	2.391.573,42

Custo de Aplicação de LE na agricultura	Valor
Custo total anual de manutenção e operação da aplicação de LE na agricultura	
COSTOM - Custo total anual de manutenção e operação, US\$/ano	
$COSTOM = COSTLB + COSTDSL + VWC + SMC$	416.765,31

Custo de Aplicação de LE em florestas	Valor
Cálculo da quantidade de sólidos secos aplicados por ano	
TDSS – Sólidos secos aplicados t/ano	8.126,14
$TDSS = [(SV)(8,34)(SS)(SSG)(365)]/(2000)(100)$	
SV – Volume diário de lodo, galões por dia	131.894,48
SS – Concentração de sólidos em suspensão, %	4
SSG – Gravidade específica do lodo	1,01
$SSG = 1/[(100-SS)/100+(SS)/(1.42)(100)]$	
Área necessária para aplicação	
SDAR – área necessária para aplicação, ac	2.031,54
$SDAR = (TDSS)(FR)/(DSAR)$	
FR – Frequência de aplicação em florestas, ano	5
DSAR – Taxa de aplicação média, t. de sólidos secos/ac/ano	20
Taxa de aplicação de lodo por hora	
HSV – Taxa de aplicação de lodo por hora, galões/hora	45.849,04
$HSV = (SV)(365)/(DPY)(HPD)$	
DPY – Período anual de aplicação de lodo, dias/ano	150
HPD – Período diário de aplicação de lodo, h/dia	7
Capacidade dos veículos de aplicação	
Capacidade (CAP) dos veículos de aplicação, galões	2.191,20
Número (NOV) de veículos necessários	14
$NOV = HSV/VHRCAP$	
CT – Tempo médio de cada viagem, min	35
VHRCAP - Taxa de carregamento de cada veículo, galões/hora	3.380,71
$VHRCAP = [(CAP)(60)(0.9)]/(CT)$	
Total de área requerida	
TLAR – Total de área requerida para aplicação em florestas, ac/ano	2.437,84
$TLAR = (1+ FWWAB)(SDAR)$	
FWWAB - Fração de área utilizada para outros fins que não a aplicação de lodo	0,2
Limpeza da área (arbustos e árvores)	
TLAWB - Total de área que necessita de limpeza, ac	121,89
$TLAWB = (FWB)(TLAR)$	
FWB – Fração da área que requer limpeza	0,05

Custo de Aplicação de LE em florestas	Valor
Gradeamento	
TLARLG - Total de área que necessita de gradeamento leve, ac	121,89
$TLARLG = (FRLG)(TLAR)$	
FRLG - Fração da área que necessita de gradeamento para estradas de acesso	0,05
Mão de obra necessária por ano	
L - Mão de obra necessária por ano, horas/ano	24.000,00
$L = 8(NOV)(DPY)/0,7$	
Consumo anual de diesel	
FU - Consumo anual de diesel, galões/ano	56.954,54
$FU = (HSV)(HPD)(DPY)(DFRCAP)/(VHRCAP)$	
DFRCAP - Taxa de consumo de diesel (galões/hora)	4
Custo da área	
COSTLAND - Custo da área, US\$	0
$COSTLAN = (TLAR)(LANDCST)$	
LANDCST - Preço da terra, US\$/ac	0
Custo da limpeza da área	
COSTCBT - Custo total da limpeza da área, US\$	165.653,56
$COSTBCT = (TLAWB)(BCLRCST)$	
BCLRCST - Custo da limpeza da área, US\$/ac	1.359,00
Custo anual de gradeamento	
COSTEW - Custo de gradeamento, US\$	248.539,58
$COSTEW = (TLARLG)(GEWCST)$	
GEWCST - Custo de gradeamento, US\$/ac	2.039,00
Custo dos veículos para aplicação de LE	
COSTMAV - Custo dos veículos para aplicação, US\$	2.772.000,00
$COSTMAV = (NOV)(COSTPV)(MSECI)/990,8$	
COSTPV - Custo para a aquisição de cada veículo, US\$	198.000,00
MSECI - Índice de custo para veículos (Marshall and Swift) vigente na época do cálculo	990,8
Custo anual da mão de obra	
COSTLB - Custo anual da mão de obra, US\$/ano	551.280,00
$COSTLB = (L)(COSTL)$	
COSTL - Custo horário da mão de obra, US\$/hora	22,97
Custo anual do diesel	
COSTDSL - Custo anual do diesel, US\$/ano	62.649,99
$COSTDSL = (FU)(COSTDF)$	
COSTDF - Custo por galão do diesel, US\$/galão	1,10
Custo anual de manutenção dos veículos de aplicação	
VMC - Custo anual de manutenção dos veículos de aplicação, US\$/ano	137.131,76
$VMC = ((HSV)(HPD)(DPY)(MCSTCAP))/(VHRCAP)MSECI/990,8$	
MCSTCAP - Custo de manutenção por hora de operação, US\$/hora	9,63

Custo de Aplicação de LE em florestas	Valor
Custo anual de manutenção da área	
SMC - Custo anual de manutenção da área, US\$/ano	39.005,47
$SMC = [(TLAR)(16)]ENRCCI/5445,83$	
ENRCCI - Índice de custo (Engineering News Record Construction) vigente na época do cálculo	5.445,83
Custo total do capital da aplicação de LE em florestas	
TBCC - Custo total do capital	
$TBCC = COSTLAND + COSTCBT + COSTEW + COSTMAV$	3.186.193,13
Custo total anual de manutenção e operação da aplicação de LE em florestas	
COSTOM - Custo total anual de manutenção e operação, US\$/ano	
$COSTOM = COSTLB + COSTDSL + VWC + SMC$	790.067,22

Custo de Aplicação de LE em áreas degradadas	Valor
Cálculo da quantidade de sólidos secos aplicados por ano	
TDSS – Sólidos secos aplicados t/ano	8.126,14
$TDSS = [(SV)(8,34)(SS)(SSG)(365)]/(2000)(100)$	
SV – Volume diário de lodo, galões por dia	131.894,48
SS – Concentração de sólidos em suspensão, %	4
SSG – Gravidade específica do lodo	1,01
$SSG = 1/[(100-SS)/100+(SS)/(1.42)(100)]$	
Área necessária para aplicação	
SDAR – área necessária para aplicação, ac	325,05
$SDAR = (TDSS)/(DSAR)$	
DSAR – Taxa de aplicação média, t. de sólidos secos/ac/ano	25
Taxa de aplicação de lodo por hora	
HSV – Taxa de aplicação de lodo por hora, galões/hora	42.983,47
$HSV = (SV)(365)/(DPY)(HPD)$	
DPY – Período anual de aplicação de lodo, dias/ano	140
HPD – Período diário de aplicação de lodo, h/dia	8
Capacidade dos veículos de aplicação	
Capacidade (CAP) dos veículos de aplicação, galões	3.960
Número (NOV) de veículos necessários	7
$NOV = HSV/VHRCAP$	
CT – Tempo médio de cada viagem, min	33
VHRCAP - Taxa de carregamento de cada veículo, galões/hora	6.480,00
$VHRCAP = [(CAP)(60)(0.9)]/(CT)$	
Total de área requerida	
TLAR – Total de área requerida para aplicação em áreas degradadas, ac/ano	422,56
$TLAR = (1 + FWWAB)(SDAR)$	
FWWAB - Fração de área utilizada para outros fins que não a aplicação de lodo	0,3

Custo de Aplicação de LE em áreas degradadas	Valor
Aplicação de calcário para ajustar o pH para o mínimo de 6.5	
TLAPH - Total de área que necessita calcário, ac	325,05
TLAPH = (FRPH)(SDAR)	
FRPH - Fração da área que requer aplicação de calcário a fim de ajustar o pH para 6.5	1
Gradeamento	
TLARLG - Total de área que necessita de gradeamento leve, ac	32,50
TLARLG = (FRLG)(SDAR)	
FRLG - Fração da área que necessita de gradeamento leve	0,1
TLARMG - Total de área que necessita de gradeamento médio, ac	97,51
TLARMG = (FRMG)(SDAR)	
FRMG - Fração da área que necessita de gradeamento médio	0,3
TLAREG - Total de área que necessita de gradeamento pesado, ac	195,03
TLAREG = (FREG)(SDAR)	
FREG - Fração da área que necessita de gradeamento pesado	0,6
Mão de obra necessária por ano	
L - Mão de obra necessária por ano, horas/ano	11.200
$L = 8(\text{NOV})(\text{DPY})/0,7$	
Consumo anual de diesel	
FU - Consumo anual de diesel, galões/ano	44.580,80
$FU = (\text{HSV})(\text{HPD})(\text{DPY})(\text{DFRCAP})/(\text{VHRCAP})$	
DFRCAP - Taxa de consumo de diesel (galões/hora)	6
Custo da área	
COSTLAND - Custo da área, US\$	0
$\text{COSTLAN} = (\text{TLAR})(\text{LANDCST})$	
LANDCST - Preço da terra, US\$/ac	0
Custo da aplicação de calcário para ajustar o pH	
COSTPHT - Custo total da aplicação de calcário, US\$	52.986,50
$\text{COSTPHT} = (\text{TLAPH})(\text{PHCST})$	
PHCST - Custo da aplicação de calcário, US\$/ac	163
Custo anual de gradeamento	
COSTEW - Custo de gradeamento, US\$	1.371.401,14
$\text{COSTEW} = (\text{TLARLG})(\text{LGEWCST}) + (\text{TLARMG})(\text{MGEWCST}) + (\text{TLAREG})(\text{WGEWCST})$	
LGEWCST - Custo de gradeamento leve, US\$/ac	1.359,02
MGEWCST - Custo de gradeamento médio, US\$/ac	2.719,01
WGEWCST - Custo de gradeamento pesado, US\$/ac	5.445,83
Custo dos veículos para aplicação de LE	
COSTMAV - Custo dos veículos para aplicação, US\$	1.295.000,00
$\text{COSTMAV} = (\text{NOV})(\text{COSTPV})(\text{MSECI})/990,8$	
COSTPV - Custo para a aquisição de cada veículo, US\$	185.000,00
MSECI - Índice de custo para veículos (Marshall and Swift) vigente na época do cálculo	990,8

Custo de Aplicação de LE em áreas degradadas	Valor
Custo anual da mão de obra	
COSTLB - Custo anual da mão de obra, US\$/ano	257.264,00
$COSTLB = (L)(COSTL)$	
COSTL - Custo horário da mão de obra, US\$/hora	22,97
Custo anual do diesel	
COSTDSL - Custo anual do diesel, US\$/ano	48.998,76
$COSTDSL = (FU)(COSTDF)$	
COSTDF - Custo por galão do diesel, US\$/galão	1,10
Custo anual de manutenção dos veículos de aplicação	
VMC - Custo anual de manutenção dos veículos de aplicação, US\$/ano	70.206,33
$VMC = ((HSV)(HPD)(DPY)(MCSTCAP))/(VHRCAP)MSECI/990.8$	
MCSTCAP - Custo de manutenção por hora de operação, US\$/hora	9,45
Custo anual de manutenção da área	
SMC - Custo anual de manutenção da área, US\$/ano	6.760,95
$SMC = [(TLAR)(16)]ENRCCI/5445,83$	
ENRCCI - Índice de custo (Engineering News Record Construction) vigente na época do cálculo	5.445,83
Custo total do capital da aplicação de LE em áreas degradadas	
TBCC - Custo total do capital	
$TBCC = COSTMAV$	1.295.000,00
Custo total anual de manutenção e operação da aplicação de LE em áreas degradadas	
COSTOM – Custo total anual de manutenção e operação, US\$/ano	
$COSTOM = COSTLB + COSTDSL + VWC + SMC + COSTLAND + COSTPHT + COSTEW$	1.807.657,75

Fonte: Estados Unidos (1995a) – valores calculados pelo autor

Anexo C - Critérios de avaliação do grau de limitação dos fatores considerados para a classificação dos solos que irão receber LE.

- **PR - Profundidade:**

- 0- nulo: latossolos, cambissolos ou podzólicos profundos.
- 2- moderado: cambissolos ou podzólicos com citação de pouca profundidade.
- 3- forte: litólicos ou outras unidades com citações de solos rasos

- **TE - Textura**

- 0- nulo: textura argilosa (35 a 60% de argila)
- 1- ligeira: textura muito argilosa (mais de 60% de argila)
- 2- moderada: textura média (15 a 35% de argila)
- 3- forte: textura siltosa (-35% de argila e -15% de areia)
- 4- muito forte: textura arenosa (- 15% de argila)

- **ER - Suscetibilidade à erosão**

- 0- nulo: solos em relevo plano
- 1- ligeiro: solos argilosos ou muito argilosos, em relevo suave ondulado
- 2- moderado: solos com textura média ou siltosa, em relevo suave ondulado e solos com textura argilosa e muito argilosa, em relevo ondulado
- 3- forte: solos de relevo ondulado com textura arenosa e /ou caráter abrupto. Relevo forte ondulado à textura muito argilosa.
- 4- muito forte: relevo forte ondulado, com textura média e arenosa. Relevo montanhoso ou escarpado independente da classe textural

- **DR - Drenagem**

- 0- nula: solos acentuadamente e bem drenados
- 2- moderada: solos moderadamente e fortemente drenados
- 3- forte: solos excessivamente drenados
- 4- muito forte: solos imperfeitamente, mal e muito mal drenados

- **RE - Relevo**

- 0- nulo: relevo plano (0-3%)
- 1- ligeiro: relevo suave ondulado (3-8%)
- 2- moderado: relevo ondulado (8-20%)
- 3- forte: relevo forte ondulado (20 e 45%)
- 4- muito forte: relevo montanhoso ou escarpado (maior que 45%)

- **PE - Pedregosidade**

- 0- nulo: sem fase pedregosa
- 4- forte: com fase pedregosa ou citação de pedregosidade

- **HI - Hidromorfismo**

- 0- nulo: solos sem indicação de hidromorfismo
- 2- moderado: solos com caráter gleico
- 3- forte: solos hidromórficos

- **FE - Fertilidade**

- 0- nulo: solos distróficos e álicos que possuam horizonte A moderado ou fraco
- 1- ligeiro: solos com horizonte A proeminente
- 2- moderado: solos com horizonte A chernozemico ou antrópico
- 3- forte: solos com horizonte A húmico
- 4- muito forte: solos com horizonte turfoso ou material orgânico

Fonte: SANEPAR, 1997

Anexo D - Foto de veículo utilizado para a aplicação de lodo de esgoto na agricultura.

Fonte: Rubin, 1991

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Fórum nacional de normatização: NBR 10.004 Resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 1987. 63p.
- ALBRECHT, C.R. Gaining and maintaining public acceptance. **BioCycle**, v.25, n.4, p.36-37, May/June 1984.
- BARDOS, R.P.; HADLEY, P.; KENDLE, A. Composting guidance in the United Kingdom. **BioCycle**, v.33, n.6, p.60-62, June 1992.
- BASTIAN, R.K. Biosolids management in the United States. **Water Environment & Technology**, v.9, n.5, p.45-50, May 1997.
- BAUER, T; SIEGER, R.B. Sewage sludge incineration under part 503B. **Water/Engineering & Management**, v.140, n.10, p.22-23, Oct. 1993.
- BERGS, C.G.; LINDNER, K.H. Sewage sludge use in the Federal Republic of Germany. **European Water Pollution Control**, v.7, n.2, p.47-52, March 1997.
- BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.13, n.2, p.187-192, mar. 1989.
- BETTIOL, W. Utilização do lodo de esgoto como fertilizante. In: COLÓQUIO REGIONAL SOBRE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO, Piracicaba, 1982. **Anais**. Piracicaba: CENA, 1982. p.227-232.
- BETTIOL, W; CARVALHO, P.C.T.; FRANCO, B.J.D.C. Utilização do lodo de esgoto como fertilizante. **O Solo**, v.75, n.1, p.44-54, jan/jun. 1983.
- BOARETTO, A.E. **Uso de lodo de esgoto como fertilizante**. Botucatu: UNESP, 1986. 185p.

- BORGATTI, D.; PSARIS, P.J. (Org.) **Beneficial use programs for biosolids management**. Alexandria: WEF, 1994. 229p.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 05, de 15 de junho de 1998. In: CETESB. **Legislação federal: controle da poluição ambiental** (Atualizada até novembro, 1995). São Paulo: CETESB, 1995. (Série Documentos / Secretaria do Meio Ambiente, ISSN 0103-264X).
- BRASIL. MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO. **Plano Plurianual 1996-1999: mensagem ao Congresso Nacional**. Brasília, 1996. 95p.
- BRASIL. SEPLAN - SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E COORDENAÇÃO. **Relatório de acompanhamento do plano plurianual – Exercício de 1996 - Tema: Saneamento**. <http://seplan.gov.br/ppa/SANEAMENTO.html> (11 de maio de 1997).
- BYE, J. To bag or not to bag. **BioCycle**, v.32, n.11, p.56-57, Nov. 1991.
- COMPANHIA DE ÁGUAS E ESGOTO DE BRASÍLIA. **O lodo de esgotos na agricultura**. Brasília, / 1996? /.
- CAMPOS, J.R. **Alternativas para tratamento de esgotos – pré tratamento de águas para abastecimento**. Americana: Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, 1994. 112p.
- CARVALHO, P.de C.T. Utilização do lodo de esgoto na agricultura. In: COLÓQUIO REGIONAL SOBRE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO, Piracicaba, 1982. **Anais**. Piracicaba: CENA, 1982. p.223-226.
- CBH-PCJ. **Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí: implantação, resultados e perspectivas**. Campinas: Arte Brasil, 1996. 26p.
- CHERMONT, L.S.; SEROA DA MOTTA, R. **Aspectos econômicos da gestão integrada e resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IPEA, 1996. 26p.
- CLAY, S.; ALBON, S. Sewage sludge incineration with environmental safeguards: Severn Trent Water's Roundhill plant. In: CATS III CONGRESS, Ostand, 1996. **Proceedings**. Ostand, 1996. p.251-259.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Procedimentos para o controle de resíduos sólidos industriais**. São Paulo, 1997. 2v.

- CONTADOR, C.R. **Avaliação social de projetos**. São Paulo: Atlas, 1988. 316p.
- CORRÊA, D. et. al. Tecnologia de fabricação de fertilizantes orgânicos. In: COLÓQUIO REGIONAL SOBRE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO, Piracicaba, 1982. **Anais**. Piracicaba: CENA, 1982. p.217-222.
- DA ROS, C.O.; AITA, C.; CERETTA, C.A.; FRIES, M.R. Lodo de esgoto: efeito imediato no milho e residual na associação aveia-ervilhaca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.17, p.257-261, maio 1993.
- DAVIS, R.D.; HALL, J.E. Production, treatment and disposal of wastewater sludge in Europe from a UK perspectives. **European Water Pollution Control**, v.7, n.2, p.9-17, March 1997.
- DEFELIPO, B.V.; NOGUEIRA, A.V.; LOURES, E.G.; ALVAREZ, V.H. Eficiência agrônômica do lodo de esgoto proveniente de uma indústria siderúrgica. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, n.15, p.389-393, ago. 1991.
- DIRKZWAGER, A.H.; DUVOORT van ENGERS, L.E.; BERG, J.J. van den. Production, treatment and disposal of sewage sludge in The Netherlands. **European Water Pollution Control**, v.7, n.2, p.29-41, March 1997.
- DONOVAN, J.F. Getting the sludge rule on line. **BioCycle**, v.34, n.4, p.40-42, Apr. 1993.
- ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Sludge incineration: problems and remedies**. Washington, 1986.
- ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Environmental regulations and technology: control of pathogens and vector attraction in sewage sludge**. Washington, 1992. 152p.
- ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Process design manual: land application of sewage sludge and domestic septage**. Washington, 1995a. 290p.
- ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Standards for the use or disposal of sewage sludge: 40 CFR Parts 403 and 503**. Washington, 1995b. 25p.
- FAUST, J.G; OBERST, R.L. Economic value of biosolids to farmers. **BioCycle**, v.37, n.1, p.67-68, Jan. 1996.
- FERNANDES, F. Lodo em estação de tratamento de água e esgoto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.2, n.1, p.169, jan./mar. 1997.

- FERNANDES, F.; PIERRO, A.C.; YAMAMOTO, R.Y. Produção de fertilizantes por compostagem do lodo de esgoto gerado por estações de tratamento de esgotos. **Pesquisa Agropecuária**, v.28, n.5, p.567-574, maio 1993.
- FOESS, G.W.; SIEGER, R.B. Pathogen/Vector attraction reduction requirements of the sludge rules. **Water/Engineering & Management**, v.140, n.6, p.25-26, June 1993.
- FORSTER, D.L.; LOGAN, T.J.; MILLER, R.H. et al. **Is municipal sewage sludge a resource for agriculture?** Wooster: Ohio Agricultural Research and Development Center, 1976. 22p.
- FORSTER, D.L.; LOGAN, T.J.; MILLER, R.H.; WHITE, R.K. **Sewage sludge landspreading in Ohio communities: 1980 perspectives.** Wooster: Ohio Agricultural Research and Development Center, 1981. 16p.
- FORSTER, D.L.; SOUTHGATE, D.D. Social institutions influencing land application of wastewater and sludge. **Journal Water Pollution Control Federation**, v.56, n.5, p.399-404, May/1984.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional de saneamento básico.** Rio de Janeiro, 1992. 50p.
- GIROVICH, M.J. Simultaneous sludge drying and pelletizing. **Water/Engineering & Management**, v.137, n.3, p.34-39, Mar. 1990.
- GOLDSTEIN, N. Building the infrastructure for sludge reuse. **BioCycle**, v.33, n.3, p.58-62, Mar. 1992.
- GOLDSTEIN, N. EPA releases final sludge management rule. **BioCycle**, v.34, n.1, p.59-63, Jan. 1993.
- GOLDSTEIN, N.; RIGGLE, D.; STEUTEVILLE, R. Sludge composting maintains growth. **BioCycle**, v.33, n.12, p.49-56, Dec. 1992.
- GOUVÊA, L.C. Estudo da compostabilidade do lodo de esgoto e avaliação química de metais pesados no decorrer do processo. 255p. Viçosa, 1995. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.
- GRÜTTNER, H. Denmark. In: MATTHEWS, P. (Ed.) **A global atlas of wastewater sludge and biosolids use and disposal.** London: IAWQ, p.43-46. 1997.

- HARRISON, R.B.; HENRY, C.L.; COLE, D.W. et al. Uso de resíduos urbanos em florestas (compact disc). In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., Águas de Lindóia, 1996. **Solo-suelo 96: trabalhos**. Piracicaba: SBCS/SLCS, 1996.
- HINESLY, T.D.; HANSEN, L.G.; BRAY, D.J. **Use of sewage sludge on agricultural and disturbed lands**. Urbana: University of Illinois, 1984. 250p. (NTIS Bulletin)
- HOFFMANN, R. **Administração da Empresa Agrícola**. Ed. Pioneira, São Paulo, 1989. 324p.
- HUFSCHMIDT, M.M.; JAMES, D.E.; MEISTER A.D.; BOWER, B.T.; DIXON, J.A. **Environment, natural systems, and development: an economic valuation guide**. Baltimore: The Johns Hopkins Press Ltd., 1983. 338p.
- INSTITUTO SOCIEDADE, POPULAÇÃO E NATUREZA. **Demanda, oferta e necessidades dos serviços de saneamento**. Brasília: SEPURB/IPEA, 1995. 219p. (Série Modernização do Setor Saneamento, 4).
- JARDIM, N.S.; WELLS, C. (Coord.) **Lixo municipal: manual para gerenciamento integrado**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 278p.
- KRAUSS, G.D.; PAGE, A.L. Wastewater, sludge and food crops. **BioCycle**, v.38, n.2, p.74-82, Feb. 1997.
- KUCHENRITHER, D. Sludge: a case of regulations without representation. **Water/Engineering & Management**, v.136, n.12, p.21-24, Dec. 1989.
- LAKE, D.L. Sludge disposal to land. In: LESTER, J.N. **Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes**. London: CRC, v.2, p.92-130. 1987.
- LEVASSEUR, J.P.; MOUSTY, P. Accelerated co-composting of refuse and sludge. **BioCycle**, v.26, n.2, p.42-43, Mar. 1985.
- LIMPURB. DEPARTAMENTO DE LIMPEZA URBANA. PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. **Limitações e intransigências para a obtenção de novas áreas para implantação de aterros sanitários**. São Paulo, 1993. (Relatório da Divisão de Aterros Sanitários 01/001/027)
- LOGSDON, G. How does society learn about sludge safety? **BioCycle**, v.33, n.5, p.68-70, May 1992.

- LUE-HING, C.; MATTHEWS, P.; NÄMER, J. et al. Sludge management in highly urbanized areas. In: MATTHEWS, P. (Ed.) **A global atlas of wastewater sludge and biosolids use and disposal**. London: IAWQ, p.7-12. 1997.
- MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificação e fatos**. São Paulo: ProdQuímica, 1994. 153p.
- MARQUES, M. O. Efeitos da aplicação do lodo de esgoto na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. Piracicaba, 1990. 164p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- MARTINS, M.T.; SANCHES, P.S. Eficácia do tratamento químico e térmico na destruição de patógenos em lodo digerido. **Revista Brasileira de Microbiologia**, v.17, n.2, p.148-154, abr/jun. 1986.
- MATTHEWS, P. Transatlantic comparison of biosolids practices. In: CONF. WATER RESIDUALS AND BIOSOLIDS MANAGEMENT: APPROACHING THE YEAR 2000, Philadelphia, 1997. **Proceedings**. Alexandria: WEF, 1997. p.9-32.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SANTIAGOM G.; CHELLI, R.A.; LEITE, S.A.S. Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.18, p.449-455, 1994.
- METCALF; EDDY INC. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3ed., New York: McGraw Hill, 1991. 1334p.
- MONNEY, L. Beneficial use program for New York city's sludge. **BioCycle**, v.22, n.8, p.72-73, Aug. 1992.
- NARDIN, G.; CHABRIER, J.P. France: eastern France – Franche Compté region, city of Besançon. In: MATTHEWS, P. (Ed.) **A global atlas of wastewater sludge and biosolids use and disposal**. London: IAWQ, p.65-69. 1997.
- NORONHA, J.F. **Projetos Agropecuários**. São Paulo: Atlas, 1987. 269p.
- OCKIER, P; MUYNCK, G De. Belgium: Flanders. In: MATTHEWS, P. (Ed.) **A global atlas of wastewater sludge and biosolids use and disposal**. London: IAWQ, p.25-27. 1997.
- O'DETTE, R. Winning public approval. **Water Environment & Technology**, v.7, n.5, p.62-65, May 1995.

- OLIVEIRA, F.C. Efeito da aplicação de lodo de esgoto em latossolo vermelho-escuro textura média e em sorgo granífero. 99p. Jaboticabal, 1992. (Trabalho de graduação - UNESP.)
- OUANOUI, B.; IGOUD, S. Study of the effects of residual sludge's from urban sewage plants used in forest plantations. **Revue Forestiere Francaise**, v.45, n.2, p.153-158, 1993.
- PAULRAJ, C; RAMULU, U.S. Effect of soil application of low levels of urban sewage sludge on the uptake of nutrients and yield of certain vegetables. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v.42, n.3, p.485-487, 1994.
- PEARCE, D.W.; BRISSON, I. The economics of waste management. In: HESTER, R.; HARRISON, R. **Waste treatment and disposal**. Cambridge: Royal Soc. of Chemistry, 1995. p. 131-152: The economics of waste management.
- PINO, F.A.; SANTOS, V.L.F. do; TORRES, A.J. et al. (Org.) **Levantamento censitário de unidades de produção agrícola do Estado de São Paulo**. São Paulo: IEA, 1997. 4 v.
- POLPRASERT, C. **Organic waste recycling**. New York: Wiley, 1989. 357p.
- PROJECTUS. Consultoria Ltda. **Relatório resumo - bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá - Plano HIDROPLAN**. Piracicaba, 1997. 203p.
- RANDALL, A. **Resource economics: an economic approach to natural resource and environmental policy**. 2 ed., New York: John Willey & Son, 1987. 434p.
- REED, S.C.; MIDDLEBROOKS, E.J.; CRITES, R.W. **Natural systems for waste management and treatment**. New York: McGraw Hill, 1988. 308p.
- RIZZINI, E.S. **Noções de compostagem**. São Paulo: Limpurb, 1996. 8p.
- RUBIN, A.R.; SAFLEY, L.M.; ZUBLENA, J.P. **Soil facts: Land application of municipal sludge - advantages and concerns**. North Carolina: North Carolina Cooperative Extension Service, 1991. 4p.
- SANEPAR. COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. **Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná**. Curitiba, 1997. 96p.
- SANTOS, H.F. Aplicação do lodo de estações de tratamento de esgoto em solos agrícolas. **Revista DAE**, v.39, n.122, p.31-38, 1979.

- SANTOS, S.S.M Saneamento Básico. In: CALDEIRON, S.S. **Recursos naturais e meio ambiente: uma visão do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1993. p.101-112.
- SANTOS, H.F.; TSUTIYA, M.T.; MIKI, M.K.; EBERT, R.; DELATORRE, C.; FURUKAWA, N.A.; MAYOR, M.S.; KAMIYAMA, H.; MACEDO, L.S.; MORAES, I.P.S. **Critérios para o uso agrícola dos biosólidos de ETES da SABESP**. São Paulo: SABESP, 1997. 35p. (Relatório Interno)
- SÃO PAULO. Lei Estadual n. 997 de 31 de maio de 1976. In: CETESB. **Legislação estadual: controle da poluição ambiental – Estado de São Paulo** (atualizada até setembro de 1995). São Paulo: CETESB, 1995. (Série Documentos / Secretaria do Meio Ambiente, ISSN 0103 – 264X)
- SÃO PAULO. Decreto Estadual n. 8.468 de 8 de setembro de 1976. In: CETESB. **Legislação estadual: controle da poluição ambiental – Estado de São Paulo** (atualizada até setembro de 1995). São Paulo: CETESB, 1995. (Série Documentos / Secretaria do Meio Ambiente, ISSN 0103 – 264X)
- SÃO PAULO. Lei Estadual n. 7.750 de 31 de março de 1992. In: CETESB. **Legislação estadual: controle da poluição ambiental – Estado de São Paulo** (atualizada até setembro de 1995). São Paulo: CETESB, 1995. (Série Documentos / Secretaria do Meio Ambiente, ISSN 0103 – 264X)
- SEADE. FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. **Programa perfil municipal: programa automatizado para recuperação de dados municipais** (software). São Paulo, 1995.
- SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE / Coordenadoria de Planejamento Ambiental. **Critérios de exigência de EIA/RIMA e roteiros para a sua elaboração a usinas de reciclagem e/ou compostagem, aterros para resíduos sólidos domiciliares e industriais e incineradores: manual de orientação**. São Paulo: SMA/CETESB, 1991. (série manuais)
- SEROA DA MOTTA, R.; MENDES, A.P.F.; MENDES, F.E.; YOUNG, C.E.F. Perdas e serviços ambientais no recurso água para uso doméstico. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v.24, n.1, p.35-72, abr. 1994.
- SEROA DA MOTTA, R. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 1998. 218p.
- SHIROTA, R.; ROCHA, M.T. **Análise do mercado potencial agrícola do lodo de esgoto biológico resultante do tratamento de esgotos urbanos na região de**

- Limeira, SP.** Piracicaba: FEALQ, 1997. 85p. (Relatório apresentado à empresa Águas de Limeira S/A.)
- SIEGER, R.B.; HERMANN, G.J. Land application requirements of the new sludge rules. **Water/Engineering & Management**, v.140, n.8, p.30-35, Aug. 1993.
- SIGMUND, W.; SIEGER, R.B. The new surface disposal requirements. **Water/Engineering & Management**, v.140, n.9, p.18-19, Sep. 1993.
- SILVA, F.C. Uso agrônômico de lodo de esgoto: efeitos em fertilidade do solo e qualidade da cana-de-açúcar. Piracicaba, 1995. 159p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- SOMMERS, L.E.; BARBARICK, K.A. Constraints to land application of sewage sludge. In: RUNGE, E.C.A. (Ed.). **Utilization, treatment, and disposal of waste on land**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p.193-216.
- SOPPER, B. Thirty years of land reclamation with biosolids. **BioCycle**, v.34, n.10, p.51-52, Oct. 1993.
- SPINOSA, L.; RAGAZZI, M. Italy. In: MATTHEWS, P. (Ed.) **A global atlas of wastewater sludge and biosolids use and disposal**. London: IAWQ, p.89-93. 1997.
- STARK, S.A. Building acceptance for biosolids utilization. **BioCycle**, v.34, n.4, p.78-80, Apr. 1993.
- STRAUCH, D.; HAVELAAR, A.H.; L'HERMITE, P. **Inactivation of microorganisms in sewage sludge by stabilization processes**. London: Elsevier, 1984. 230p.
- SUTHERLAND, G.D. Market development: problems and solutions. In: LUND, H.F. **The McGraw-Hill Recycling Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1993. cap. 7, p.7.1-7.19: Market development: problems and solutions.
- TIETENBERG, T.H. **Environmental and natural resource economics**. 2ed., Glenview: Scott, Foresman and Company, 1988. 559p.
- WALKER, J.M. Winning strategies for land application. **BioCycle**, v.27, n.5, p.40-44, May/June 1986.
- WEF RESIDUALS MANAGEMENT COMMITTEE. Biosolids and the 503 standards. **Water Environment & Technology**, v.5, n.5, p.57-62, May 1993.