

O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto – uma revisão

Gláucia Eliza Gama Vieira¹
Marcelo Mendes Pedroza²
João Fernandes de Sousa³
Camilla Mendes Pedroza⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar as principais formas de aproveitamento e destinação final de lodos de esgotos, destacando-se aqui, os processos de incineração e pirólise, a disposição no solo e a destinação final do lodo em aterros sanitários. As principais vantagens do uso agrícola de bio-sólido são, aumento da produtividade, melhoria da qualidade química do solo e economia com uso de fertilizantes químicos. Entretanto, as substâncias orgânicas, metais tóxicos e agentes patogênicos, contidos no resíduo, representam limitações ao uso. Os aterros sanitários são o destino mais comum para a disposição do bio-sólido produzido no Brasil. Apesar da sua simplicidade, a disposição em aterros pode causar vários problemas como, a poluição das águas subterrâneas e do solo com o chorume, poluição visual e emissão de metano para a atmosfera. A incineração não constitui um método de eliminação completa de lodo, uma vez que parte do resíduo permanece como cinzas. A pirólise é uma prática que pode ser empregada para o aproveitamento do lodo de esgoto como biomassa. Nesse processo térmico, são gerados produtos com valores agregados, tais como óleo, gases e carvão que podem ser utilizados como fonte de combustíveis ou em outros usos relacionados à indústria.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. Aproveitamento de lodo de esgoto. Pirólise.

Abstract

The aim of this paper is to present the major forms of use and final disposal of sewage sludge, especially here, the processes of incineration and pyrolysis, the provision in the soil and the final sludge disposal in landfills sites. The main advantages of agricultural use of bio solids are increased productivity, improving the quality of the soil chemistry and economics with the use of chemical fertilizers. However, the organic substances, toxic metals and pathogens contained in the residue represent limitations on use. Landfills are the most common destination for sewage sludge produced in Brazil. Despite its simplicity, the disposal in landfills can cause various problems such as pollution of groundwater and soil with slurry, visual pollution and emission of methane into the atmosphere. Incineration is not a method of complete elimination of sludge, as part of the waste remains as ash. Pyrolysis is a practice that can be employed for the use of sewage sludge as biomass. In this process heat, it is generated products with added values, such as oil, gas and coal that can be used as a source of fuel or other uses related to industry.

Keywords: Sewage sludge. Use of sewage sludge. Pyrolysis.

1 Química Industrial, Doutora em Química, Professora da Universidade Federal do Tocantins (UFT). E-mail: glau.eliza@ig.com.br

2 Químico Industrial, Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental, Doutorando em Engenharia Química (UFRN), Professor do Instituto Federal do Tocantins (IFTO). E-mail: mendes_palmas@hotmail.com

3 Doutor em Engenharia Química, Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). E-mail: joao@eq.ufrn.br

4 Bióloga (UFPB). E-mail: caca_pedroza@hotmail.com

Artigo recebido em 08/02/2011 e aceito em 27/04/2011.

1 Introdução

A gestão adequada do biossólido, produzido em estações de tratamento de esgotos, vem se tornando preocupação crescente na sociedade moderna. Embora significativo avanço tenha ocorrido nas últimas décadas com respeito à redução da geração de biossólidos, principalmente nos países desenvolvidos, a destinação desse resíduo é um grande problema ambiental para as empresas de saneamento, públicas ou privadas (CASSINI, 2003; PEDROZA *et al.*, 2010).

O gerenciamento do lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento é uma atividade de grande complexidade e alto custo que, se for mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados destes sistemas (LUDUVICE, 2001).

No Reino Unido, a produção do lodo chegou a quase 1 milhão de m³/ano; 50 milhões de m³/ano, na Alemanha; 4,2 milhões de m³/ano, na Suíça e 170 mil m³/ano em Singapura. Em Sydney, a produção do biossólido atinge 190 mil toneladas/ano atualmente (HOSSAIN; STREZOV; NELSON, 2009).

De acordo com Barneto *et al.* (2009), em 2005, a produção espanhola de lodo de esgoto foi de 1.120.000 toneladas de matéria seca. Seu uso principal foi a disposição no solo (725.000 toneladas).

Atualmente, cerca de 0,25 milhões de toneladas (peso seco) de lodo de esgoto são produzidos anualmente na Austrália, sendo que um terço do biossólido é aplicado na agricultura (MOLLOY *et al.*, 2005).

Estima-se que a produção de lodo no Brasil está entre 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano (SOARES, 2004). No estado de São Paulo, onde se concentra a maior parte das estações de tratamento de esgotos, já se ultrapassou, há alguns anos, a produção de 100 toneladas de lodo seco por dia (OLIVEIRA, 2000). Na região metropolitana de São Paulo, a produção diária das cinco maiores ETEs está estimada em 540 toneladas/dia de lodo (base seca) para 2005. Conforme previsão de Tsutya (2000), a produção de lodo de esgoto em base seca na região metropolitana de São Paulo será de 785 toneladas diárias em 2015.

Embora o lodo biológico normalmente seja o resíduo produzido em maior quantidade em uma ETE, outros tipos de sólidos são retidos

em diferentes operações nas estações de tratamento de esgotos. A figura 1 apresenta o desenho esquemático da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Vila União, localizada em Palmas, Tocantins. O sistema é composto por rede coletora, tratamento preliminar, estação elevatória, reator UASB e Lagoa Facultativa. O efluente final é lançado no Córrego Água Fria, localizado nas proximidades da ETE. Os principais resíduos sólidos gerados nessa estação são: (1) areia, plásticos, papéis e gordura do tratamento preliminar e (2) lodo biológico do reator UASB e Lagoa Facultativa. Os resíduos sólidos, gerados no tratamento preliminar, são tratados com cal e dispostos em valas localizadas na própria estação. O lodo biológico, produzido no reator UASB e em Lagoa Facultativa, é lançado em leitos de secagem. A descarga do lodo, feita diretamente do reator UASB, é realizada a cada mês em quantidade média que varia entre 33,6 e 50 m³ de lodo.

De acordo com Damasceno e Campos (1998), o tratamento e disposição de lodo devem ser geridos para minimizar problemas ambientais com o odor e o lançamento no ambiente de contaminantes e patógenos. Entre as principais opções de disposição de lodo no ambiente encontram-se: 1) disposição no solo (uso agrícola, florestas, áreas de recuperação); 2) disposição em aterro; 3) disposição no mar; 4) incineração.

A pirólise é uma prática que pode ser empregada para o aproveitamento do lodo de esgoto como biomassa. Nesse processo térmico, são gerados produtos com valores agregados, tais como, óleo, gases e carvão que podem ser utilizados como fonte de combustíveis ou em outros usos relacionados à indústria (PEDROZA *et al.*, 2010).

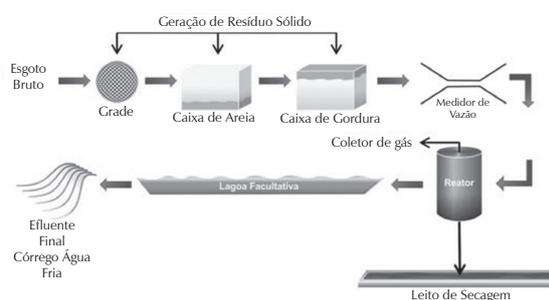


Figura 1 – Desenho esquemático da ETE Vila União, localizada em Palmas, Tocantins
Fonte: Cardoso e Vieira, (2010).

O principal objetivo desta revisão é apresentar as formas de aproveitamento e destinação final do lodo produzido em estações de

tratamento de esgotos. São discutidos aqui, os processos de incineração e pirólise, a disposição no solo e a destinação final do lodo em aterros sanitários.

2 Uso em agricultura

Uma das alternativas encontradas para a disposição final desses resíduos como benefício ambiental e principalmente econômico é a reciclagem agrícola, devido a sua composição em termos de matéria orgânica e nutrientes para as plantas (ANDREOLI *et al.*, 2006).

O lodo é uma importante fonte de matéria orgânica, micro e macronutrientes (tabela 1). Quando aplicado ao solo, pode conferir maior capacidade de retenção de água, maior resistência à erosão, diminuição do uso de fertilizantes minerais, maior resistência da planta aos fitopatógenos e aumento da produtividade da cultura (CORRÊA, 2004). No entanto, a presença de metais pesados no biossólido pode comprometer o seu uso agrícola. Segundo Canellas *et al.* (1999), uma fração da matéria orgânica do lodo, não biodegradável, tem a capacidade de quelatar metais e, isso reduz a quantidade disponível desses elementos para o processo de absorção pelas plantas. A contaminação dos vegetais por metais pesados depende de sua mobilidade no solo e de sua biodisponibilidade. Esses elementos apresentam baixas solubilidade e mobilidade no solo, com risco baixo de contaminação (MUCHOVEJ; OBREZA, 2004). Deve-se considerar que os metais pesados, encontrados no biossólido, encontram-se combinados a compostos orgânicos e que são menos absorvidos pelas plantas do que os que podem ser encontrados em fertilizantes químicos comerciais (FROSTA; KETCHUM JÚNIOR, 2000).

Um aspecto importante que deve ser levado em consideração é a acumulação e biomagnificação de metais pesados na cadeia alimentar. Os seres humanos podem se contaminar por esses elementos químicos através da ingestão de partes comestíveis de plantas contaminadas, de consumo de animais, previamente contaminados, ou de subprodutos preparados com esses vegetais (CHIBA, 2005).

Alguns poluentes orgânicos presentes no lodo também tornam inviável a aplicação de lodo na agricultura. Segundo Andreoli; von Sperling e Fernandes (2001), o acúmulo desses compostos tóxicos no lodo acontece, geralmente, quando

efluentes industriais são tratados juntamente com o esgoto doméstico. Tais compostos são adsorvidos no floco do lodo biológico. Os principais poluentes orgânicos mais comuns nos efluentes industriais são: cianeto, fenol, cloreto de metileno, tolueno, etil-benzeno, tricloroetileno, tetracloroetileno, clorofórmio, naftaleno, ftalato-butil de benzila, acroleína, xileno, cresóis, acetofenona, metil sobutil acetona, difenilamina, anilina e acetato de etila. De acordo com Clarke *et al.* (2008), as dioxinas, presentes no lodo de esgoto, têm recebido atenção especial devido à sua toxicidade, persistência e bioacumulação. O grupo mais importante de dioxinas são os 2,3,7,8-congêneros, dos quais 12 têm sido identificados como particularmente tóxicos. As principais fontes de geração são a produção industrial de substâncias como clorofenóis, bifenilas policloradas (PCBs) e cloranil, a incineração de lixo e emissões por veículos motorizados.

Dentre os organismos patogênicos, cinco grupos podem estar presentes no lodo: os helmintos, os protozoários, os fungos, os vírus e as bactérias (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001). Segundo Black (1999), os helmintos despertam grande interesse, pois o ambiente encontrado nos processos de tratamento de esgoto é propício ao embrionamento de seus ovos. Alguns gêneros como *Ascaris*, *Toxocarae* *Trichuris* são extremamente resistentes à ampla variedade de condições físicas e químicas, sendo capazes de sobreviver por vários anos no solo.

Devido ao potencial de risco representado pelos contaminantes que podem ser encontrados na composição do biossólido, tais como substâncias orgânicas e inorgânicas tóxicas e agentes patogênicos, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) elaborou uma resolução que disciplina o seu uso como fertilizante. A Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006,

[...] define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto, gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. (BRASIL, 2006, p. 1).

A resolução abrange aspectos relacionados aos parâmetros de qualidade do resíduo e às características dos locais de aplicação, dentre outros. No estado de São Paulo, o estabelecimento de procedimentos e critérios para o uso de resíduos em áreas agrícolas é dado pela norma "Aplicação de biossólidos em áreas

agrícolas – critérios para projeto e operação – P4230” (CETESB, 1999). No Estado do Paraná, a Resolução CONAMA nº 375 é complementada pela resolução da Secretaria do Estado do Meio Ambiente (SEMA) 021/09 (PARANÁ, 2009).

Tipo de lodo	C	N	P	K	Ca	Mg
Aeróbio	32,1	4,19	3,7	0,36	1,59	0,6
Anaeróbio	20,1	2,22	0,67	0,95	0,83	0,3

Tabela 1 - Teor de nutrientes e carbono em diversos tipos de biossólidos no Brasil (% de matéria seca)
Fonte: Andreoli; von Sperling; Fernandes, (2001).

2.1 A experiência internacional e brasileira com reuso de lodo de esgoto

A experimentação sobre o uso de lodo de esgoto na agricultura, no Brasil, acontece desde a década de oitenta. Bettiol; Carvalho e Franco (1982) foram os primeiros pesquisadores a publicarem artigos sobre a utilização de lodo na agricultura. O uso de biossólidos para áreas florestais ainda é fato recente. Em 1998, um grupo de pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP) iniciou as primeiras pesquisas com o uso de biossólidos em culturas florestais (POGGIANI; BENEDETTI, 1999). Antes de 1998, foi encontrado na literatura apenas o registro de um trabalho com produção de mudas (MORAIS *et al.*, 1997). Recentemente, Vieira e Silva (2005) estudaram o efeito de biossólido seco granulado sobre o crescimento inicial de quatro espécies arbóreas pertencentes a diferentes categorias ecológicas. Esse biossólido foi produzido pela ETE de Barueri, da companhia de Saneamento SABESP (SP).

O grupo de pesquisadores da ESALQ/USP (FARIA, 2000; FARIA; RODRIGUES, 2000; FORTES NETO, 2000; VAZ, 2000; ROCHA, 2002; VELASCO-MOLINA, 2004; GUEDES, 2005; ANDRADE, 2005) publicaram resultados sobre a utilização de biossólidos em plantios de eucalipto. Segundo Faria e Rodrigues (2000), o potencial de uso do lodo da ETE de Barueri (SABESP) em áreas reflorestadas, próximas à estação, é muito grande. Os autores concluíram também que existe demanda para o uso do biossólido como fertilizante e condicionador de solo em plantios de *Eucalyptus* e *Pinus* no estado de São Paulo, indicando a existência de uma área reflorestada aproximada de 321 mil hectares. Kronka (2003), em trabalho realizado pelo Instituto Florestal do Estado, informa que a área plantada

aumentou nos últimos anos e que existe um total de 770 mil hectares de reflorestamento com *Pinus* e *Eucalyptus* em São Paulo e isso mostra a elevada potencialidade dos reflorestamentos em consumir o lodo de esgoto produzido nas estações de tratamento (ANDREOLI *et al.*, 2006). No Estado de São Paulo, o biossólido vem sendo avaliado pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) como fertilizante para as culturas de pupunha (litoral norte), de banana (Vale do Ribeira) e de milho e café (Campinas) com resultados promissores em termos de aumento de produtividade e redução no uso de fertilizantes químicos (FARIAS; RODRIGUES, 2000).

Chiba (2005) avaliou o uso de biossólido como fonte de nitrogênio e fósforo para a cultura da cana-de-açúcar, entre os anos de 2002 e 2004. O autor comprovou que o lodo constituiu-se uma fonte eficiente de nitrogênio para a cana-soqueira, não sendo necessária a aplicação adicional de fontes nitrogenadas para a obtenção de colmos e de açúcares similares ao do tratamento com adubação mineral convencional. Para a cana-planta, foi necessário aplicar 75% da dose de fósforo, recomendada para obter rendimentos similares aos da adubação mineral. Nesse estudo, o autor concluiu que a aplicação de biossólidos não causou efeitos prejudiciais à qualidade do solo e da cultura produzida. Foi observado, também, que os teores de metais pesados no solo, nas folhas e no caldo da cana foram semelhantes àqueles obtidos com a adubação mineral.

Guedes (2005) analisou a ciclagem biogeoquímica de nutrientes em um experimento com *Eucalyptus grandis* fertilizado com taxas de aplicação de 10, 20 e 40 Mg/ha de biossólido, base seca, cinco anos após o plantio. O biossólido proporcionou aumentos significativos de fitomassa, de produção de serapilheira e na devolução de nutrientes ao solo com o aumento das taxas de aplicação. Para a dose de 20 Mg/ha a taxa média de degradação foi igual a 2,42 Mg/ha. ano. O autor afirma ainda que a aplicação do biossólido propiciou, na fase final da rotação, maiores estoques de nutrientes em todos os compartimentos do ecossistema e que há uma maior capacidade em manter a sustentabilidade produtiva do ecossistema, quando se aplica biossólido.

O lodo de esgoto, gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs) da Sanepar, é higienizado pelo processo de estabilização alcalina prolongada (PARANÁ, 2009). Segundo Marin

et al. (2010), além de ser sanitariamente eficiente, a higienização alcalina do lodo converte o lodo em corretivo de acidez do solo, o que pode trazer vantagens agrícolas e econômicas, com ganho de produtividade de até 40% e economia média na compra de adubos químicos e calcário de R\$ 500,00 por hectare.

Salvador (2006) avaliou o efeito da aplicação de lodo de esgoto tratado alcalinamente sobre a correção da acidez do solo, sobre o fornecimento de nutrientes ao solo e sobre o desenvolvimento de cultivo de soja. Foi utilizado lodo de esgoto urbano proveniente da ETE-Belém/Sanepar de Curitiba-PR. As plantas foram cultivadas em vasos com Latossolo Háplico. Os resultados da pesquisa revelaram que doses crescentes do biossólido melhoraram os atributos ligados à fertilidade do solo, tais como, elevação do pH, eliminação do Al^{3+} trocável e aumento na disponibilidade de nutrientes como o Ca e Mg, o que gerou melhor desenvolvimento das plantas.

Bastos et al. (2009) aplicaram a metodologia de Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM) como base para a apreciação crítica, preliminar e exploratória da Resolução CONAMA nº 375/2006 e do risco envolvido em diferentes cenários hipotéticos de exposição, que envolvam o trabalhador e o consumidor com a prática do uso agrícola de lodos de esgotos. Foram construídos dois cenários de exposição para o uso de biossólidos Classes A e B: (i) risco do consumidor, decorrente do consumo de olerícolas (folhosas e raízes) ingeridas cruas; (ii) risco do trabalhador, decorrente da ingestão involuntária de partículas de biossólidos ou de solo. Os resultados revelaram que riscos mais elevados parecem estar mais relacionados à saúde ocupacional (risco do trabalhador) do que à saúde do consumidor. Com relação aos patógenos considerados, os riscos mais elevados parecem estar relacionados à transmissão de vírus e, na sequência, à de helmintos, protozoários e, por último, de bactérias.

De acordo com Fytili e Zabaniotou (2008), o uso agrícola de lodo na Europa tem se tornado o principal método de eliminação, sendo que 37% do lodo produzido é utilizado na agricultura, 11% incinerados, 40% depositados em aterros e 12% usado em outras áreas como silvicultura e recuperação de áreas degradadas.

Os efeitos da aplicação de lodo de esgoto em cultivares de oliveiras (*Olea europaea*) foram

estudados por Gascó e Lobo (2007) na Espanha. As plantas foram cultivadas em vasos de 8,5 L e submetidas aos seguintes tratamentos: 0, 3,66, 7,32, 14,65, 29,3, 58,6 e 117,2 g lodo/kg solo, que corresponderam, respectivamente, a 0, 4, 8, 16, 32, 64 e 128 Mg ha⁻¹ de peso seco de lodo de esgoto. Foi observado na pesquisa, que nas taxas de aplicação de 64 e 128 Mg ha⁻¹ ocorria queda e queima de parte das folhas das plantas após 120 dias de cultivo, embora as taxas cumulativas de metais pesados no solo não ultrapassem os valores limites dos regulamentos europeus. Em geral, as taxas de aplicação de lodo aumentaram significativamente o nível de Cr, Ni, Cu, Zn, Cd e Pb em solos e plantas.

Wang et al. (2008) estudaram o efeito da aplicação de lodo de esgoto em solos e gramíneas nativas (*Zoysia japonica* e *Poa annua*). O lodo de esgoto usado era tipicamente doméstico da China. As taxas de aplicação usadas durante o experimento foram de 0, 15, 30, 60, 120 e 150 t ha⁻¹. Os resultados experimentais mostraram que o teor de nutrientes do solo, principalmente em matéria orgânica, foi aumentado após a aplicação do lodo de esgoto. O biossólido proporcionou um crescimento das gramíneas, em todas as taxas de aplicação, bem superior ao do experimento de controle. As concentrações de metais pesados no solo também aumentaram, porém, o teor de Zn não excedeu o padrão de qualidade rigoroso chinês para o solo. Pb e Cu não excederam o padrão para a classe B no solo, mas a concentração de Cd no solo alterado pelo lodo de esgoto ultrapassou o padrão da classe B.

Singh e Agrawal (2010) estudaram o efeito da aplicação de lodo de esgoto no cultivo de arroz (*Oryza sativa*), avaliando o acúmulo de metais pesados, crescimento e produção vegetal. Foram aplicadas as taxas 0, 3, 4, 5, 6, 9, 12 kg m⁻². Os dados da pesquisa mostram que o lodo de esgoto alterou as propriedades físico-químicas do solo, aumentando, assim, a disponibilidade de metais pesados no solo e, conseqüentemente, com maior acúmulo nas partes das plantas. O comprimento da raiz diminuiu, enquanto o comprimento do ramo, número de folhas, área foliar e biomassa total aumentou significativamente, quando cultivados sob diferentes taxas. A safra de arroz aumentou em 60%, 111%, 125%, 134% e 137% em 3, 4, 5, 6, 9 e 12 kg m⁻², respectivamente, quando comparados àqueles cultivados em solos sem alterações.

3 Aterros sanitários

A destinação em aterros sanitários é a forma mais comum para o lodo de esgoto das ETEs brasileiras. Esse processo pode ser realizado de duas formas: (1) a disposição conjunta com os resíduos sólidos urbanos, genericamente denominados de lixo; e (2) a disposição em aterros construídos exclusivamente para esse fim. Na maior ETE da América Latina, a da Companhia de Saneamento SABESP na cidade de Barueri, estado de São Paulo, a co-disposição com o lixo urbano em um aterro sanitário, localizado na Rodovia dos Bandeirantes, é o destino final dado ao biossólido. Nesse caso, a disposição só é permitida pela Prefeitura Municipal de São Paulo desde que o peso do biossólido não ultrapasse 5% do peso dos resíduos urbanos dispostos e sua umidade não supere 60% (TSUTYA, 2000). O autor salienta que o grande inconveniente dessa prática é a diminuição da vida útil dos aterros sanitários, destinados à deposição dos resíduos sólidos e que ela só é viável, quando há a cooperação entre os responsáveis pela produção do biossólido e pela coleta e tratamento do resíduo sólido urbano.

Para Silvério (2004), os destinos mais comuns para o biossólido produzido no Brasil são os aterros sanitários, ou exclusivos, próximos às ETEs, lagoas de lodo ou mesmo de maneira não controlada em áreas agrícolas. Atualmente, o destino final adotado para a totalidade do biossólido, produzido na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), é a co-disposição com resíduos sólidos urbanos (lixo) nos Aterros Sanitários Municipais São João (Zona Leste) e Bandeirantes (Zona Oeste) da Prefeitura Municipal de São Paulo.

No aterro exclusivo, os lodos de esgotos são depositados após serem secos termicamente ou como tortas tratadas. Ensaio geotérmico mostram que tortas com 40% de lodo de esgotos com cal virgem, ou 90% de sólidos, são as mais adequadas para esse tipo de destino (TSUTIYA, 2000).

Nos EUA, Webb; Jokela e Smith (2000) apresentam um custo de US\$ 50,00, por tonelada seca, para a disposição de biossólido em aterros sanitários. Segundo Lopes (2001), a SABESP teve um custo para a disposição final de biossólidos no estado de São Paulo, de aproximadamente R\$ 450.000.000,00 na região metropolitana, R\$ 20.000.000,00 no interior do Estado e R\$ 10.000.000,00 no litoral. O volume do lodo

de esgoto produzido na região metropolitana corresponde a 93% do total produzido no Estado, sendo que o interior e o litoral contribuem com 5% e 2%, respectivamente.

Park e Heo (2002) afirmam que o melhor método adotado para o tratamento de resíduos urbanos é a reciclagem e reuso, no entanto, a fração orgânica, passível de reciclagem pelo processo de compostagem, é da ordem de 40% do volume total do resíduo produzido em países de economia industrializada, já em países em desenvolvimento o resíduo sólido (lixo) pode ter uma parcela orgânica não reciclável maior, reduzindo significativamente esse porcentual. Os aterros sanitários são conhecidos como o método mais oportuno e barato para dispor a parcela sólida não reciclável. Entretanto, esse método simples pode causar vários problemas como, por exemplo, a poluição das águas subterrâneas, lixiviação, emissão de metano e contaminação dos solos. Viana (1999) ressalta que os aterros sanitários, embora importantes, apresentam algumas limitações como o tempo de vida razoavelmente curto e a grande dificuldade na obtenção de locais adequados para sua implantação nas proximidades dos centros urbanos, que não aqueles considerados de recarga de aquíferos. Além disso, têm sido descritas na literatura outras questões que podem estar ligadas a instalações de aterros sanitários, no que diz respeito ao impacto social e danos biológicos causados às populações circunvizinhas e também aos trabalhadores do local (SILVÉRIO, 2004).

Os principais aspectos negativos da disposição de biossólidos em aterros sanitários são: a exalação de odor desagradável, quando o biossólido não for devidamente estabilizado, e a poluição visual, o que tem causado reclamações justificáveis das populações vizinhas aos aterros. Adicionalmente, a produção de chorume e o seu tratamento são outro fator de preocupação na operação de aterros sanitários (FARIA, 2007).

Há uma tendência mundial no sentido de proibir a disposição do biossólidos em aterros sanitários. A justificativa é que estudos recentes indicam ser possível o seu reuso em outras atividades. Isso, por um lado, reduziria a pressão por recursos extraídos da natureza, por exemplo, os fertilizantes minerais, por outro, reduziria a necessidade da construção de novos aterros. Na Europa, foi formulada e adotada uma diretriz pelos países membros que obriga a coleta e

tratamento de esgotos de todas as cidades com mais de 2000 habitantes (STENGER, 2000). Aliada ao potencial aumento na produção de biossólidos, a diretoria ainda proibiu, a partir do ano de 2002, o uso de aterros sanitários como destino final para resíduos com possibilidade de reciclagem.

Nos EUA, a disposição do biossólido em aterros sanitários vem sendo reduzida gradativamente, devido aos elevados custos e a dificuldade em se encontrar áreas apropriadas a esse fim. Em 1998, 17% dos biossólidos eram dispostos em aterros sanitários, sendo que, em 2010, a disposição representou apenas 10%. Há uma expectativa de que essa tendência mundial de não permitir que resíduos com possibilidades de reuso sejam depositados em aterros venha a ser seguida também pelo Brasil (TSUTYA, 2000).

4 Incineração

A incineração é o processo de destruição térmica de resíduos de alta periculosidade, mediante a exposição dos mesmos a temperaturas superiores a 1000°C, transformando-os em cinzas inertes. Durante o processo de incineração, os gases gerados são adequadamente tratados e as cinzas (volume reduzido) são depositadas em aterros apropriados. É o método mais adequado para o tratamento de resíduos sólidos de serviços de saúde (KHIARI *et al.*, 2004).

Durante a incineração de biossólidos, a massa inicial é reduzida em até 5 vezes, restando apenas os sólidos fixos. Essa alternativa normalmente é empregada, quando a contaminação do biossólido é muito alta, ou quando há escassez de áreas adequadas à implementação de alternativas. A incineração do biossólido, além de ser potencialmente poluidora da atmosfera, consome grande quantidade de energia e requer elevados investimentos em filtros para a retenção dos gases tóxicos produzidos (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001).

No entanto, Lundin *et al.* (2004) afirmam que um dos aspectos favoráveis da incineração, ou co-incineração de resíduos urbanos, é a possibilidade de reaproveitamento de componentes ou da energia contida no biossólido. Ela pode produzir calor e eletricidade em substituição a outras fontes energéticas, como óleo combustível ou gás natural. A energia produzida pode ainda ser utilizada no próprio processo, reduzindo assim o custo operacional

da atividade. Segundo os autores, a receita proporcionada por esse aproveitamento de energia pode representar o equivalente a 11% dos custos operacionais totais dessa opção. Valores típicos do poder calorífico de diferentes tipos de lodo são apresentados na tabela 2.

Santos (2009) cita que a Usina Verde, localizada no Rio de Janeiro, é um exemplo de utilização do processo de incineração para a geração de energia. Segundo a pesquisadora, o incinerador pode tratar trinta toneladas diárias de resíduo sólido urbano com uma produção energética de 0,7 MW.

Diferentes técnicas vêm sendo estudadas para recuperar algumas substâncias úteis durante o processo de incineração. Uma delas utiliza o ácido sulfúrico para dissolver o fósforo contido na matéria orgânica para sua posterior recuperação. O processo requer uma quantidade elevada de produtos químicos, entretanto, não só o fósforo, como também os metais pesados podem ser recuperados para posterior tratamento individual ou disposição em aterros para resíduos perigos. O potencial dessa alternativa levou o governo sueco a estipular como meta, até o ano de 2010, a recuperação de pelo menos 75% do fósforo contido nos biossólidos gerados naquele país (LUNDIN *et al.*, 2004).

Tipo de Lodo	Poder Calorífico (kJ/kg)
Lodo bruto primário	23.000 – 29.000
Lodo digerido anaeróbico	12.793
Lodo ativado	19.770 – 23.000

Tabela 2 - Poder calorífico de diferentes tipos de lodos de esgotos

Fonte: Andreoli; von Sperling; Fernandes, (2001).

5 O processo de pirólise e o aproveitamento de lodo de esgoto

Várias tecnologias estão sendo desenvolvidas e representam outras alternativas viáveis para o aproveitamento do biossólido. Dentre essas alternativas, citam-se: a pirólise, a oxidação úmida e o processo de gaseificação. A pirólise tem muitas vantagens comparadas as outras alternativas. No processo pirolítico, são gerados produtos que podem ser usados, tais como óleo, gases e carvão, como fonte de combustíveis ou em outros usos relacionados à indústria

petroquímica (KARAYILDIRIM; YANIK; YUKSEL, 2006).

A pirólise pode ser definida como a degradação térmica de qualquer material orgânico na ausência parcial ou total de um agente oxidante, ou até mesmo, em um ambiente com uma concentração de oxigênio capaz de evitar a gaseificação intensiva do material orgânico. A pirólise geralmente ocorre a uma temperatura que varia, desde os 400°C, até o início do regime de gaseificação (PEDROZA *et al.*, 2010).

Existem dois tipos de processos de pirólise,

o convencional (*slow pyrolysis*) e a pirólise rápida. Os termos “pirólise lenta” e “pirólise rápida” se diferenciam entre si através de variáveis de processos tais como: (1) taxa de aquecimento, (2) temperatura, (3) tempo de residência das fases sólida e gasosa e (4) produtos desejados. De acordo com essas variáveis de processos, os tipos de pirólise foram subdivididos em: (1) carbonização; (2) convencional; (3) rápido; (4) *flash*-líquido; (5) *flash*-gás; (6) ultra; (7) vácuo; (8) hidro-pirólise e (9) metano-pirólise (VIEIRA, 2004), conforme tabela 3.

Variantes do processo	Tempo de residência	Temperatura do processo, °C	Produtos obtidos
carbonização	horas/dia	400 – 450	carvão vegetal
convencional	5 – 30 min	até 600	bio-óleo, carvão e gás
rápida	0,5 – 5 s	500 – 550	bio-óleo
<i>flash</i> -líquido	< 1 s	< 650	bio-óleo
<i>flash</i> -gás	< 1 s	> 650	gás combustível
vácuo	2 – 30 s	400	bio-óleo
metano-pirólise	< 10 s	>700	produtos químicos
hidro-pirólise	< 10 s	<500	bio-óleo e produtos químicos

Tabela 3 - Variantes do processo de pirólise

Fonte: Adaptado de Gómez, (2002).

Enquanto o processo de pirólise convencional (pirólise lenta) é dirigido, especificamente para a produção de carvão, a pirólise rápida é considerada um processo avançado, no qual, controlando-se os parâmetros de processo, podem ser obtidas quantidades consideráveis de bio-óleo. As temperaturas, nesse caso, podem variar entre 550 e 650°C (VIEIRA, 2000).

Segundo Gómez (2002), o processo de pirólise rápida, conduzido no sentido de obter elevados rendimentos de bio-óleo, caracteriza-se por: (a) taxas muito elevadas de aquecimento, variando de 600 a 1200°C/min; (b) temperatura de reação em torno de 500°C; (c) tempo de residência dos va-pores menor que 2 segundos, (d) rápida transferência de massa do interior da partícula para a superfície e rápido resfriamento de vapores; (e) biomassa com diâmetro de partícula de até 2 mm e umidade em torno de 10%.

5.1 Experiências da pirólise de lodo de esgoto

Shen e Zhang (2004) realizaram a pirólise de uma mistura de lodo de esgoto (80%) com lixo urbano (20%) a 500°C e obtiveram 17% de óleo pirolítico com poder calorífico de 33 MJ/kg e propriedades similares às do óleo diesel.

O lodo da estação de tratamento de esgoto - Belém (SANEPAR), aeróbio, não calado com uma porcentagem de 49% de matéria orgânica e 51% de cinzas foi pirolisado em temperaturas e tempos que variaram 350-700°C e 30-120 minutos. Foram produzidos até 17% de óleos combustíveis, com 4,5% de hidrocarbonetos alifáticos e poder calorífico de 34,54 kJ/g e também 60 - 80% de sólidos com características adsorventes que, posteriormente, foram ativados com dióxido de carbono, apresentando índices de lodo e azul de metileno de até 676 mg/g e 14 mg/g, respectivamente. Tais resultados mostram as potencialidades

do emprego do lodo de esgoto sanitário, na produção de óleo combustível e de adsorventes de baixo custo. Esses adsorventes podem ser utilizados no tratamento de efluentes industriais (MOCELIN, 2007).

A empresa ENERSLUDGE, da Austrália, produz óleo pirolítico de lodo. A planta tem a capacidade de processar 20 toneladas de lodo por dia, produzindo 200-300 litros de óleo pirolítico por tonelada de lodo seco (DOSHI; VUTHALURU; BASTOW, 2003).

Fonts *et al.* (2009) determinaram que o conteúdo de cinzas tem grande influência na pirólise de lodos de esgoto do tipo anaeróbio. Segundo dados da pesquisa, o teor de cinzas da biomassa favoreceu um aumento do rendimento da fração gasosa e a diminuição do percentual da fração líquida nas condições operacionais estudadas (reator de leito fluidizado, temperatura do leito de 550°C, gás de arraste nitrogênio). A concentração de gás H₂ na fração gasosa era bem maior nas amostras que possuíam maiores teores de cinzas. Este fato pode ser atribuído às reações de desidrogenação, favorecidas pelo efeito catalítico das cinzas na pirólise dessa biomassa. Domínguez; Menéndez e Pis (2006) trabalharam com dois tipos de lodos de esgotos e também observaram que a produção de H₂ era maior, quando se empregava um lodo com maior teor de cinzas.

Lutz *et al.* (2000) pirolisaram três tipos de lodos: (1) lodo doméstico do sistema de lodos ativados; (2) lodo doméstico de digestor anaeróbio; (3) lodo de uma indústria de verniz. O reator pirolítico funcionava em sistema de batelada, a 380°C, com um tempo de retenção de 3 horas em atmosfera de nitrogênio. O lodo ativado apresentou o maior rendimento na obtenção de óleo (31,4%), seguido do lodo industrial (14,2%) e do lodo digerido (11%), conforme tabela 4. O óleo obtido no experimento possuía uma concentração de 26% de ácidos graxos para o lodo ativado e de apenas 3% para o lodo digerido.

Tipo de lodo	Rendimento (%)			
	Óleo	Carvão	Água	Gás
Lodo ativado	31,4	50,1	6,8	11,7
Lodo digerido	11	69,4	10,2	9,4
Lodo industrial	14,2	68	10,1	7,7

Tabela 4 - Rendimentos das frações orgânicas, carvão, água e gás resultantes de processos de pirólise de lodos de esgotos doméstico e industrial
Fonte: Adaptado de Lutz *et al.*, (2000).

Karayildirim; Yanik e Yuksel (2006) estudaram os produtos de pirólise de lodo de esgoto em duas situações: (1) usando um lodo misto (lodo químico + lodo aeróbio) de uma indústria petroquímica (LM) e (2) óleo flotado de um decantador primário de uma refinaria (OL). O experimento de pirólise se deu em reator a pressão atmosférica e a uma vazão de nitrogênio gasoso de 25 mL/min. O reator era aquecido a uma taxa de 7 °C/min até atingir 500°C, sendo mantida essa temperatura por 1 hora. Os rendimentos dos produtos obtidos nessa pesquisa são apresentados na tabela 5.

Tipo de lodo	Composição (%)			
	Óleo	Gás	Água	Carvão
LM	13,2	20,9	26,0	39,9
OL	29,8	14,9	14,1	41,2

Tabela 5 - Rendimento das fases de pirólise de lodo
Fonte: Adaptado de Karayildirim; Yanik; Yuksel, (2006).

Os principais produtos gasosos obtidos foram, CO, hidrogênio e metano para o lodo OL; já no lodo LM eram os gases CO, CO₂ e C₃, e o fato do lodo LM possuir maior quantidade de CO_x pode estar relacionado com a maior concentração de grupos carboxílicos em sua composição, tabela 6. Os gases da pirólise de LM e OL têm poder calorífico de 29,9 e 35,8 MJNm⁻³, respectivamente (KARAYILDIRIM; YANIK; YUKSEL, 2006). Esse calor pode ser usado como parte da energia requerida para a planta de pirólise. Chang *et al.* (2000) afirmaram, através de estudos, que a fase gasosa de pirólise de lodo de esgoto, contendo uma concentração de gases de 19%, possuía um poder calorífico de 2,55 MJNm⁻³.

Menedez *et al.* (2004), estudando pirólise convencional e de forno micro-ondas com quatro tipos de lodos, obtiveram uma fase gasosa com alto teor de CO e H₂ (48 – 62%) para micro-ondas, enquanto que na pirólise em forno convencional, os gases possuíam uma alta concentração de hidrocarbonetos de alto poder calorífico (25%). O poder calorífico dos gases na pirólise convencional variou entre 13,0 a 14,0 MJNm⁻³, enquanto que na pirólise em forno micro-ondas, o valor oscilou entre 6,0 a 8,6 MJNm⁻³.

Werle e Wilk (2010) relatam que a fração gasosa do processo de pirólise é constituída de hidrogênio, metano, monóxido carbono e

dióxido de carbono. O poder calorífico dessa mistura gasosa é cerca de 15MJ/m³.

Hossain; Strezov e Nelson (2009) pirolisaram amostras de lodos de diferentes origens, incluindo lodos doméstico, comercial e industrial. Todas as amostras foram pirolisadas em reator de leito fixo, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. Os principais gases formados durante a decomposição dos lodos foram: CH₄, C₂H₄, C₂H₆, CO, CO₂ e H₂. O escape do

material volátil, neste trabalho, foi monitorado através de cromatografia gasosa. O CO₂ foi o principal produto formado em temperaturas mais baixas, enquanto que o CO era formado em temperaturas em torno de 500°C. Os hidrocarbonetos foram determinados na faixa de temperatura entre 300 e 600°C, ao passo que hidrogênio começou a ser liberado a partir de 300°C e mostrou uma taxa constante de liberação até a temperatura final do processo.

Tipo de Lodo	Composição (%)								
	H ₂	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	CO	CO ₂
LM	4,59	3,04	1,13	11,46	5,42	1,59	-	51,34	21,43
OL	23,96	19,47	6,32	6,43	4,22	1,99	1,24	27,32	9,05

Tabela 6 - Composição dos gases da pirólise de lodo de esgoto a 500 °C

Fonte: Adaptado de Karayildirim; Yanik; Yuksel, (2006).

Inguanzo *et al.* (2002) pesquisaram pirólise de lodo de esgoto e descobriram que o poder calorífico dos gases era influenciado pela presença de hidrocarbonetos nessa fase. Segundo dado da pesquisa, foi obtido um poder calorífico de 25,0 MJNm⁻³ à temperatura de 455°C em reator pirolítico operado com uma taxa de aquecimento de 5 °C/min. Esse calor liberado está relacionado com a liberação máxima de C₂H₄ e C₂H₆. A uma taxa de aquecimento de 60 °C/min, a liberação dos gases aconteceu em temperaturas mais elevadas e os compostos CH₄, H₂ e CO possuíam as mais altas concentrações. No caso do aquecimento à taxa de 60 °C/min, o poder calorífico máximo observado foi de 20 MJNm⁻³ e ocorreu à temperatura de 600°C.

5.2 Aplicações dos produtos da pirólise

Os produtos obtidos durante a pirólise (gases, líquidos e sólidos) são gerados em proporções diferentes, dependendo dos parâmetros considerados como, por exemplo, a temperatura final do processo, pressão de operação do reator, o tempo de residência das fases sólidas, líquidas e gasosas dentro do reator, o tempo de aquecimento e a taxa de aquecimento das partículas de biomassa, o ambiente gasoso e as propriedades iniciais da biomassa. O principal objetivo no processo de pirólise é a obtenção de produtos com densidade energética mais alta e melhores propriedades do que aquelas da biomassa inicial. Esses produtos podem

ser usados para abastecer energeticamente o próprio processo ou serem comercializados como produtos químicos ou combustíveis (VIEIRA, 2004).

Os principais produtos obtidos durante a pirólise de biomassa são o bio-óleo (líquido), o carvão (sólido) e a fração gasosa. Devido a seus poderes energéticos, esses materiais obtidos possuem utilizações potenciais diversas (VIEIRA, 2000).

O bio-óleo é constituído de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, juntamente com mais de 200 compostos identificados e tem um alto valor energético. Segundo Sánchez *et al.* (2009), os compostos do bio-óleo podem ser agrupados nas seguintes classes: n-alcanos e 1-alcenos com um número de carbonos, variando entre C11 e C31; hidrocarbonetos monoaromáticos que incluem benzeno, tolueno, estireno, fenol, 1H-indeno e seus derivados alquilam; compostos aromáticos contendo nitrogênio e oxigênio, tais como: piridina, piridinas alquilas, 1H-pirrol, 1H-indol, isoquinolina, metilquinolinas, 9H-carbazole e benzofurano; nitrilas alifáticas e aromáticas; ácidos carboxílicos (RCOOH), onde R representa longas cadeias de átomos com 14, 15, 16 e 18 átomos de carbono; longas amidas de cadeia alifática e esteroides como: colesteno, colestadieno ou colestenoformil. Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA), incluindo a naftalina, metil naftalenos, bifênil, acenaftileno, fluoreno, fenantreno, antraceno,

benzo[g]-quinolina, methylphenanthrenes, 11H-benzo[a]-fluoreno, benzo[a]-antraceno, criseno e benzo[a]-pireno foram também detectados nesses óleos.

Esse óleo pode ser transportado e armazenado para geração de calor em caldeiras como óleo combustível. É usado na substituição de fenol petroquímico ou pode ser fracionado para produzir derivados da química fina, entre outras aplicações (VIEIRA, 2004).

A fração sólida, o carvão, um resíduo sólido rico em carbono, pode ser utilizado para a produção de carvão ativado, um excelente composto empregado na adsorção de compostos inorgânicos e orgânicos. O carvão ativado é amplamente utilizado na extração de metal, purificação de água, na medicina (absorção do veneno), limpeza de gases e na indústria de alimentos (remoção de impurezas orgânicas) (MENEDEZ *et al.*, 2004).

A mistura de gases, gerada no processo de pirólise, é formada pelos componentes CO₂, CO, CH₄, H₂ e hidrocarbonetos de pequenas cadeias carbônicas C2 e C3. Esses gases podem ser utilizados para produção de calor e geração de energia, mas são, geralmente usados, para produzir energia no próprio processo de pirólise de biomassa ou para a secagem das matérias-primas (SÁNCHEZ *et al.*, 2009).

6 Considerações finais

Dentre os processos mais comuns de disposição e/ou aproveitamento de lodo de esgoto cita-se: aterro sanitário, uso agrícola, incineração e disposição superficial. Com relação ao uso agrícola, em geral, pode-se afirmar que a substituição da adubação química pelo biossólido, pode contribuir para o melhor desenvolvimento das plantas, pela melhoria das características físicas e químicas do solo e pelo aumento da rentabilidade econômica. É importante, também, colocar, como limitação ao emprego deste resíduo na agricultura, a possibilidade da presença de metais pesados e agentes patogênicos.

A forma mais comum de disposição de lodo de esgoto no Brasil é o aterro sanitário. A principal preocupação com essa prática é a geração de gases, chamados de biogás. Por conter altas concentrações de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), contribuem para o efeito estufa e, conseqüentemente, para o aquecimento global. Assim, o biogás deve ser drenado e

queimado para a mitigação dos efeitos causados pelo seu lançamento na atmosfera.

A incineração é um processo eficiente, utilizado na redução do volume do lodo de esgoto. Quando combinado com co-geração, a incineração pode resgatar grande parte da energia contida no lodo. No entanto, as emissões de gases nocivos, talvez seja a principal desvantagem dessa forma de disposição de lodo de esgoto.

O tratamento térmico por pirólise é uma alternativa ambientalmente correta a ser empregada no reaproveitamento de biossólidos. As frações, líquida e gasosa, obtidas durante o processo, apresentam elevados poderes caloríficos que podem ser reaproveitados no próprio processo pirolítico. O resíduo sólido, gerado durante o processo, também pode ser reaproveitado na construção civil.

Referências

ANDRADE, C. A. **Fração orgânica de biossólidos e efeito no estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica de um latossolo cultivado com eucalipto**. 2005. 121f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANDREOLI, C. V.; TAMANIN, C. R.; HOLSBACH, B.; PEGORINI, E. S.; NEVES, P. S. Uso de lodo de esgoto na produção de substrato vegetal. In: ANDREOLI, C. V. **Biossólidos - Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: Ed. ABES (Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental), 2006. 398 p.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. Rio de Janeiro: Ed. ABES, 2001. 483 p.

BARNETO, A. G.; CARMONA, J. A.; ALFONSO, J. E. M.; BLANCO, J. D.. Kinetic models based in biomass components for the combustion and pyrolysis of sewage sludge and its compost. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 86, p. 108-114, 2009.

BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; DIAS, G. M. F.; BARONY, F. J. A. Critical analysis of the Brazilian legislation for agricultural use of sewage sludge to the assessment of quantitative microbiological risk. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v. 2, p. 143-159, 2009.

- BETTIOL, W; CARVALHO, P. C. T.; FRANCO, B. J. D. C. Utilização do lodo de esgoto como fertilizante. **O Solo**, Piracicaba, v.75, p. 44-54, 1982.
- BLACK, J. G. **Microbiologia – fundamentos e perspectivas**. 4 ed., Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Koogan, 1999. 829 p.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 375, de 29 de agosto de 2006. Critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Brasília, DF, 2006.
- CANELLAS, L. P.; BERNER, P. G.; SILVA, S. G.; BARROS e SILVA, M.; SANTOS, G. A. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A; SILVA, L. S; CANELLAS, L. P; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 69 –90.
- CARDOSO, A. S.; VIEIRA, G. E. G. **Avaliação do potencial das microalgas residuais como uma alternativa à cadeia produtiva do biodiesel**. 2010. Disponível em: <<http://www.jovencientista.org.br/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID=%7B86ACCE86-85B8-49D3-B26D-F5CE1228AF20%7D&ServiceInstUID=%7B2645C3C0-B59B-43F6-9745-6077D8618A24%7D>>. Acesso em: 26 abr. 2011.
- CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: Ed. ABES (Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental), 2003. 210 p.
- CETESB. Aplicação de biossólidos em áreas agrícolas – critérios para projeto e operação. **Norma Técnica P4230**. São Paulo, SP, 1999. 32p.
- CHANG, C.; SHIE, J.; LIN, J.; LIN, J.; WU, C.; LEE, D.; CHANG, C. Major products obtained from the pyrolysis of oil sludge. **Energy e Fuels**, v.14, p. 1176 - 1183, 2000.
- CHIBA, M. K. **Uso de lodo de esgoto na cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo: Parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura**. 2005. 142 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- CLARKE, B.; PORTER, N.; SYMONS, R.; BLACKBEARD, J.; ADES, P; MARRIOTT, P. Dioxin-like compounds in Australian sewage sludge – Review and national survey. **Chemosphere**, v.72, p. 1215 - 1228, 2008.
- CORRÊA, R.S. Efficiency of five biosolids to supply nitrogen and phosphorus to ryegrass. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, p. 1133 - 1139, 2004.
- DAMASCENO, S.; CAMPOS, J. R. Avaliação de lodo de estação de tratamento de esgotos sanitários visando o uso agrícola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Suprema Gráfica e Editora, 1998. p.135-137.
- DOMÍNGUEZ, A.; MENÉNDEZ, J. A.; PIS, P.P. Hydrogen rich fuel gas production from the pyrolysis of wet sewage sludge at high temperature. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 77, p. 127-132, 2006.
- DOSHI, V. A.; VUTHALURU, H. B.; BASTOW, T. Investigations into the control of odour and viscosity of biomass oil derived from pyrolysis of sewage sludge. **Fuel Processing Technology**, v. 86, p. 885 - 897, 2003.
- FARIA, L. C. **Fertilização de povoamentos de eucalipto com biossólido da Ete de Barueri, SP: demanda potencial e nível mínimo de resposta**. 2000. 85 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- _____, L. C. **Uso do lodo de esgoto (biossólido) como fertilizante em eucaliptos: demanda potencial, produção e crescimento das árvores e viabilidade econômica**. 2007. 105 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- _____, L. C.; RODRIGUES, L. C. E. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: Avaliação do potencial de uso do resíduo da ete de Barueri, SP. In: BETTIOL, W; CAMARGO, O. A. **Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto**. Embrapa, 2000. p. 209-213.
- FONTES, I.; AZUARA, M.; GEA, G.; MURILLO, M. B. Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge. **Journal of Analytical**

- and **Applied Pyrolysis**, v. 85, 184–191 p., 2009.
- FORTES NETO, P. **Degradação de biossólido incorporado ao solo avaliada através de medidas microbiológicas**. 2000. 113 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- FROSTA, A. L.; KETCHUM JÚNIOR, L. H. Trace metal concentration in durum wheat from application of sewage sludge and commercial fertilizer. **Advances in Environmental Research**, v.4, p. 347 – 355, 2000.
- FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.12, p. 116 - 140, 2008.
- GASCÓ, G.; LOBO, M. C. Composition of a Spanish sewage sludge and effects on treated soil and olive trees. **Waste Management**, v. 27, p. 1494 - 1500, 2007.
- GÓMEZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. 2002. 369 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- GUEDES, M. C. **Efeito do lodo de esgoto (biossólidos) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantações de eucalipto**. 2005. 74 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- HOSSAIN, M. K; STREZOV, V; NELSON, P. F. Thermal characterisation of the products of wastewater sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.85, p. 442 - 446, 2009.
- INGUANZO, M; DOMINGUEZ, A; MENÉNDEZ, J. A; BLANCO, C. G; PIS, J. J. On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gases fractions. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.63, p. 209 - 222, 2002.
- KARAYILDIRIM, T.; YANIK, J.; YUKSEL, B. Characterisation of products from pyrolysis of waste sludges. **Energy e Fuel**, v.85, p. 1498 - 1508, 2006.
- KHIARI, B.; MARIAS, F.; ZAGROUBA, F.; VAXELAIRE, J. Analytical study of the pyrolysis process in a wastewater treatment pilot station. **Desalination**, v.167, p. 39 - 47, 2004.
- KRONKA, F. J. N. Mapeamento e quantificação do reflorestamento no estado de São Paulo. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 8, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003.
- LOPES, E. B. M. **Diversidade metabólica em solo tratado com biossólidos**. 2001. 65p. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodos de esgotos – tratamento e disposição final**. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 484 p.
- LUNDIN, M.; OLOFSSON, M.; PETTERSSON, G. F.; ZETTERLUND, H. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. **Resources Conservation**, v. 41, p. 255 - 278, 2004.
- LUTZ, H.; ROMEIRO, G. A.; DAMASCENO, R. N.; KUTUBUDDIN, M.; BAYER, E. Low temperature conversion of some Brazilian municipal and industrial sludges. **Bioresource Technology**, v.74, p. 103 - 107, 2000.
- MARIN, L. M. K. S.; BITTENCOURT, S.; ANDREOLI, C. V.; CARAFINI, C.; LIMA, M. R.; SERRAT, B. M.; MOCHIDA, G. A. Determination of maximum annual rate of application sewage sludge sanitized by alkaline process in soils of the metropolitan region of Curitiba, Brazil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.15, p. 113 - 118, 2010.
- MENEDEZ, J.A.; INGUANZO, M.; DOMINGUEZ, A.; PIS, P.P. Microwave pyrolysis of sewage sludge: analysis of the gas fraction. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 71, p. 657 - 667, 2004.
- MOCELIN, C. **Pirólise de lodo de esgoto sanitário: produção de adsorvente e óleos combustíveis**. 2007. 112 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2007.

- MOLLOY, R.; MCLAUGHLIN, M.; WARNE, M.; HAMON, R.; KOOKANA, R.; SAISON, C. **Background and scope for establishing a list of prohibited substances and guideline limits for levels of contaminants in fertilizers.** CSIRO Land and Water, Centre for Environmental Contaminants Research, Relatório Final, 2005.
- MORAIS, S. M. J.; ATAIDES, P. R. V.; GARVIA, D. C.; KURTZ, F. C.; OLIVEIRA, O. S.; WATZLAAWICK, J. F. Uso de lodo de esgoto da Corsan, Santa Maria (RS), comparado com outros substratos orgânicos. **Sanare**, v.8, p. 44 - 49, 1997.
- MUCHOVEJ, R. M.; OBREZA, T. A. **Biosolids: are these residuals all the same?** SS-AGR-167. Series of the Agronomy Department. Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 2004. 3 p.
- OLIVEIRA, F. C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num latossolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar.** 2000. 247 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- PARANÁ. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Resolução SEMA 021/09 - Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. **Diário Oficial do Estado do Paraná**, Curitiba, n. 7962, p. 13 - 16, 2009.
- PARK, Y. J.; HEO, J. Vitrification of fly ash from municipal solid waste incinerator. **Journal of Hazardous Materials**, v. 91, p. 83 - 93, 2002.
- PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, p. 147 - 157, jul./dez.2010.
- POGGIANI, F.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade do lodo de esgoto urbano em plantações de eucalipto. **Silvicultura**, v. 80, p. 48 - 52, 1999.
- ROCHA, G. N. **Monitoramento da fertilidade do solo, nutrição mineral e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido.** 2002. 48 p.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- SALVADOR, J. T. **Reciclagem agrícola de lodo de esgoto tratado no Paraná pelo processo N-Viro: Efeitos em solos, plantas, água de percolação e a possibilidade da alteração de sua relação Ca:Mg.** 2006. 142 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, 2006.
- SANCHEZ, M. E.; MENÉNDEZ, J. A.; DOMÍNGUEZ, A.; PIS, J. J.; MARTÍNEZ, O.; CALVO, L. F.; BERNAD, P. L. Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge. **Biomass and Bioenergy**, v.33, p. 933 - 940, 2009.
- SANTOS. **Viabilidade do aproveitamento do lixo urbano da cidade de Maceió como alternativa energética.** 2009. 111 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Alagoas, 2009.
- SHEN, L.; ZHANG, D. Low-temperature pyrolysis of sewage sludge and putrescible garbage for fuel oil production. **Energy e Fuel**, v.84, p. 809 - 815, 2004.
- SILVÉRIO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto, da matéria orgânica do lixo urbano e de resíduos industriais. **O Agrônomo**, v.1, p. 5 - 8, 2004.
- SINGH, R.P.; AGRAWAL, M. Variations in heavy metal accumulation, growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.73, p. 632 - 641, 2010.
- SOARES, M. R. **Coeficiente de distribuição (k_d) de metais pesados em solos do estado de São Paulo.** 2004. 202 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- STENGER, A. Experimental valuation of food safety: application to sewage sludge. **Food Policy**, v. 25, p. 211 - 218, 2000.
- TSUTYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: BETTIOL, W; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Embrapa, 2000. 312 p.
- VAZ, L. M. S. **Crescimento inicial, fertilidade do solo e nutrição de um povoamento de**

***Eucalyptus grandis* fertilizado com bio sólido.** 2000, 41 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

VELASCO-MOLINA, M. **Nitrogênio e metais pesados em latossolo e eucalipto cinquenta e cinco meses após aplicação de bio sólido.** 2004. 62 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

VIANA, E. **Resíduos alimentícios de lixo domiciliar: coleta, processamento, caracterização e avaliação da viabilidade como um ingrediente para ração de frangos de corte.** 1999. 164 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

VIEIRA, G. E. G. **Resíduos da produção industrial de borracha (ETRI) e bebida (ETE) – Uma avaliação pela tecnologia de LTC.** 2000. 322 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, 2000.

_____, G. E. G. **Fontes alternativas de energia – Processo aperfeiçoado de conversão térmica.**

2004. 181p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Fluminense. 2004.

VIEIRA, R. F.; SILVA, C. M. M. S. Soil amendment with sewage sludge and its impact on soil microflora. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 34, 2005.

WANG, X.; CHEN, T.; GE, Y.; JIA, Y. Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors. **Journal of Hazardous Materials**, v.160, p. 554 - 558, 2008.

WEBB, R. S.; JOKELA, E. J.; SMITH, W. H. **Recycling composted organic wastes on Florida's forest lands.**, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 2000. (Series of the Department of Forest Resources and Conservation, Florida Cooperative Extension Service).

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