

PROSAB - programa de Pesquisa em saneamento Básico

**MANUAL PRÁTICO PARA A COMPOSTAGEM DE
BIOSSÓLIDOS**

**UEL
Universidade Estadual de Londrina**

FINEP Financiadora de Estudos e Projetos

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

MCT Ministério da Ciência e Tecnologia

CEF Caixa Econômica Federal

FINEP Financiadora de Estudos e Projetos

Presidente

Lourival do Carmo Mônaco

Diretoria

Celso Alves da Cruz

Leila Miragaia Matz

Hugo Tulio Rodrigues

Grupo Coordenador PROSAB

inserir

Coordenação Nacional da Rede Tema IV- Edital 01/96

Fernando Fernandes - Universidade Estadual de Londrina

Universidade Estadual de Londrina

Reitor

Jackson Proença Testa

Coordenador de Pesquisa e Pós Graduação

Ivan Frederico Lupiano Dias

Diretor do Centro de Tecnologia e Urbanismo

Antonio Carlos Zani

Chefe do Departamento de Construção Civil

Paulo Roberto de Oliveira

AUTORES

FERNANDO FERNANDES
SANDRA MÁRCIA CESÁRIO PEREIRA DA SILVA

EQUIPE TÉCNICA

FERNANDO FERNANDES - *Coordenador Técnico-Científico*
Universidade Estadual de Londrina – fernando@uel.br

SANDRA MÁRCIA CESÁRIO PEREIRA DA SILVA
Universidade Estadual de Londrina- sandra@uel.br

VANETE SOCCOL
Universidade Federal do Paraná

MARIO MIYASAWA
Instituto de Pesquisas Agronômicas do Paraná

MARIA DE FÁTIMA MEZALIRA BLOCH
Bolsista RHAÉ-CNPq / PROSAB

GISSELMA APARECIDA BATISTA
Bolsista CNPq - AP / PROSAB

LUCIANA LÁZZARO MANGIERI
Bolsista CNPq - AT / PROSAB

APOIO ADMINISTRATIVO

MARIA APARECIDA DA SILVA PIRES DE LIMA
CELSO MARTINS DA SILVA

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM APLICADO AO TRATAMENTO DE BIODSÓLIDOS

- 1.1. O problema do biossólido no saneamento e a alternativa de compostagem
- 1.2. Fundamentos básicos do processo de compostagem
- 1.3. Parâmetros físico-químicos do processo de compostagem
 - 1.3.1. Aeração
 - 1.3.2. Temperatura
 - 1.3.3. Umidade
 - 1.3.4. Relação C/N
 - 1.3.5. Estrutura
 - 1.3.6. pH

CAPÍTULO 2. TIPOS DE BIODSÓLIDOS GERADOS E RESÍDUOS ESTRUTURANTES

- 2.1. Sistemas de tratamento de esgotos e tipos de biossólidos gerados
- 2.2. Processamento do lodo
 - 2.2.1. Desidratação natural
 - 2.2.2. Sistemas de desidratação mecânicos
- 2.3. Resíduos estruturantes

CAPÍTULO 3. CONTAMINANTES DOS BIODSÓLIDOS

- 3.1. Metais pesados
- 3.2. Microrganismos patogênicos
- 3.3. Compostos orgânicos tóxicos

CAPÍTULO 4. SISTEMAS DE COMPOSTAGEM

- 4.1. Sistema de leiras revolvidas (Windrow)
- 4.2. Sistema de leiras estáticas aeradas
- 4.3. Sistemas de reatores biológicos
 - 4.3.1. Reatores de fluxo vertical
 - 4.3.2. Reatores de fluxo horizontal
 - 4.3.3. Reatores de batelada
- 4.4. Vantagens e desvantagens dos sistemas

CAPÍTULO 5. CONSIDERAÇÕES SOBRE A OPERAÇÃO DA USINAS DE COMPOSTAGEM

- 5.1. Características das ETEs e tipos de lodo gerado
- 5.2. Resíduo estruturante
- 5.3. Aeração
- 5.4. Balanço de massa
- 5.5. Instalações de apoio

- 5.6. Equipamentos necessários
- 5.7. Escolha do local e impactos ambientais
- 5.8. Levantamento de mercado

CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES SOBRE A OPERAÇÃO DA USINA

- 6.1. Controle de qualidade dos resíduos a serem compostados
- 6.2. Procedimentos e controle do processo de compostagem
- 6.3. Controle de qualidade da maturação e dos produtos finais
 - 6.3.1. Maturação
 - 6.3.2. Beneficiamento do composto
 - 6.3.3. Qualidade e segurança do produto final

CAPÍTULO 7. POSSIBILIDADES DE USO DO COMPOSTO

CAPÍTULO 8. ASPECTOS LEGAIS, INSTITUCIONAIS E MERCADOLÓGICOS

- 8.1. Responsabilidade da empresa de saneamento
- 8.2. Necessidade de ações interinstitucionais
- 8.3. Licenciamento ambiental e estudos de impacto ambiental
- 8.4. Normas a serem observadas
- 8.5. Aspectos mercadológicos

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APRESENTAÇÃO

Este manual é mais um produto do sistema de redes cooperativas de pesquisa implantadas através do PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico , por iniciativa da FINEP, CNPq, MCT, CEF, SEPURP e com o apoio de várias Universidades e Entidades ligadas ao saneamento e meio ambiente no Brasil.

A questão da gestão dos lodos produzidos em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, foi tratada pelo tema IV do programa de pesquisa e agregou as Universidades de Londrina, USP-São Carlos, Universidade Federal do Espírito Santo, SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná e TECPAR - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Paraná.

O termo *biossólido* está sendo proposto pela WEF- Water Environmental Federation para designar o resíduo produzido por estações de tratamento de esgotos sanitários domésticos, quando ele é utilizado de forma útil. O lodo compostado terá uma aplicação útil, portanto, este manual utiliza indistintamente as palavras lodo e biossólido no texto, por entender que a nova nomenclatura deverá ter um período de transição para se consolidar.

Dentre as alternativas de aproveitamento dos biossólidos , a reciclagem agrícola é particularmente adequada ao Brasil, pois pode ser implementada com baixo custo, segurança sanitária e excelentes resultados agronômicos. A reciclagem agrícola dos biossólidos, realizada dentro de critérios seguros, contribui para fechar o ciclo ecológico dos nutrientes retirados do solo pela agricultura, melhorar a resistência à erosão das terras agricultáveis e para a implantação de métodos sustentáveis de produção agrícola.

Dentre as alternativas de tratamento do lodo para esta finalidade, a compostagem é uma tecnologia privilegiada, por permitir o processamento integrado de vários resíduos urbanos e agroindustriais, bem como a produção de um insumo de alta qualidade agronômica, sanitariamente seguro e de boa aceitação no mercado.

Na falta de uma legislação específica sobre Normatização do tratamento e uso dos biossólidos, são feitas referências às Normas Internacionais e à Proposta de Norma Técnica da SANEPAR. Esta companhia de saneamento reuniu, a partir de 1992, em um programa de pesquisa, mais de 60 pesquisadores de várias Instituições , o que resultou em conhecimentos consistentes sobre este tema .Por esta razão, ainda que provisoriamente, foram indicados os parâmetros fixados por esta proposta de norma

Não é tarefa fácil transformar dados de experimentos científicos específicos, em um manual cujo objetivo é divulgar de forma direta , simplificada e resumida as diretrizes básicas para a implantação de um sistema de compostagem de biossólidos. Com esta finalidade, os autores lançaram mão de sua experiência em pesquisas sobre compostagem que se iniciaram na década de 80, anotações de visitas técnicas a sistemas instalados no Brasil e em outros países e certamente dos resultados das pesquisas desenvolvidas no âmbito do PROSAB. As críticas serão muito bem vindas e devem ser endereçadas diretamente aos organizadores do manual.

Capítulo 1 - FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM APLICADO AO TRATAMENTO DOS BIODSÓLIDOS

1.1 - O problema dos biossólidos no saneamento e a alternativa de compostagem

Após a utilização da água potável e sua conseqüente transformação em esgoto, as estações de tratamento concentram a poluição remanescente no lodo, antes de devolver à natureza os efluentes tratados. O lodo é, portanto, o último resíduo do ciclo urbano da água.

Quando o lodo produzido no sistema de tratamento de esgotos sanitários é utilizado de forma útil, ele pode ser denominado “Biossólido”, como preconiza a Water Environmental Federation (WEF).

O lodo de esgoto é um resíduo sólido de composição variável, rico em matéria orgânica, que é separado da fase líquida nos processos de tratamento através da decantação ou da flotação. Em sistemas aerados, a média de produção é de 17,5 Kg/ano de lodo seco por equivalente habitante, ou seja, 23.979 Kg/dia de lodo pastoso, com 20% de matéria sólida, para cada 100.000 habitantes. Em termos comparativos, pelos padrões brasileiros, esta produção diária de lodo representa em peso, 39% do lixo urbano produzido por estes mesmos 100.000 habitantes.

À medida em que as redes de coleta de esgoto são ampliadas e são implantadas novas estações de tratamento, a produção de lodo aumenta. A melhoria da eficiência dos tratamentos de águas residuárias também contribui para aumentar a produção de lodo, pois existe uma relação entre o grau de tratamento e a quantidade de lodo produzido. A correta gestão deste resíduo é, portanto, um problema ambiental e sanitário relevante e que, segundo alguns autores, chega a representar até 60% do custo operacional de uma ETE.

As principais alternativas de tratamento e destino final de lodos de esgoto (Tabela 1.1) incluem sua disposição em aterros sanitários, incineração, disposição oceânica, e várias formas de disposição no solo, tais como a recuperação de áreas degradadas, uso como fertilizante em grandes culturas, reflorestamento e *land farming*. Destas alternativas, a disposição oceânica foi proibida nos Estados Unidos e alguns países da Europa. A disposição em aterros, embora bastante utilizada, sofre cada vez maiores restrições, tais como a da Diretiva da Comunidade Econômica Européia, que proíbe a disposição de resíduos sólidos em aterros a partir de 2002, com exceção dos chamados resíduos últimos (teor de matéria orgânica e água menor que 5%).

Tabela 1.1 - Exemplos de alternativas de destino final para o lodo de esgoto praticadas em alguns países da Europa e dos Estados Unidos.

País	Aterros sanitários	Agricultura	Incineração	Disposição oceânica
França	40	40	20	0
Dinamarca	27	37	28	8
Grã Bretanha	19	46	5	30
Alemanha	65	25	10	0
Itália	55	34	11	0
Portugal	28	11	0	61
Bélgica	50	28	22	0
Estados Unidos	37	34	17	7

Fonte : Bonnin, 1998

A reciclagem agrícola é outra prática bastante utilizada pois transforma o lodo em um insumo agrícola , contribuindo assim para fechar o ciclo bioquímico dos nutrientes minerais, fornecendo matéria orgânica ao solo, estocando, assim, o carbono na forma de compostos estáveis e não liberando CO₂ na atmosfera , que contribui para aumentar o efeito estufa. Este último aspecto da reciclagem agrícola do lodo começa a ganhar cada vez mais importância , pois a produção das emissões de CO₂ , como no caso da incineração , atuam no sentido de desequilibrar o meio natural.

A incineração é uma alternativa cara, mas bastante prática, principalmente para os grandes centros urbanos. Ela pode permitir a recuperação de parte do potencial calorífico do lodo, e reduzir em média 80% do volume a ser disposto em aterros.

Os indicadores atuais apontam para o crescimento do uso agrícola e da incineração , esta última, principalmente nos grandes centros urbanos.

Além dessas alternativas já consolidadas, há pesquisas promissoras sobre outras formas de tratamento como a oxidação úmida, síntese catalítica e pirólise.

No Brasil, a questão do destino final do lodo de esgoto permaneceu esquecida até recentemente, quando modernas e eficientes estações de tratamento de esgotos foram instaladas, sem qualquer proposta do que fazer com o lodo gerado. Em certos casos, o lodo foi acumulado nas áreas próximas às estações , com riscos ambientais imprevisíveis. A falta de uma alternativa segura de tratamento e destino final do lodo gerado em uma ETE pode anular, parcialmente, os benefícios do saneamento.

Quando usado como insumo agrícola o lodo passa a ser fonte de matéria orgânica, micro e macro-nutrientes para o solo, conferindo-lhe maior capacidade de retenção de água, maior resistência à erosão, com diminuição do uso de fertilizantes minerais e possivelmente propiciando maior resistência das plantas aos fitopatógenos.

Pelo fato do lodo também conter microrganismos patogênicos, sua disposição no solo ,sem qualquer tratamento, pode colocar em risco a saúde pública. A compostagem é uma alternativa natural de tratamento do lodo , que pelo efeito da elevação da temperatura promove a desinfecção do resíduo, tendo como produto final um insumo de alto valor agrônômico. É também uma alternativa privilegiada para a utilização simultânea de outros tipos de resíduos urbanos, como será abordado no decorrer deste manual.

1.2 – Fundamentos básicos do processo de compostagem

A compostagem é praticada desde a História antiga , porém até recentemente, de forma empírica . Gregos , romanos, e povos orientais já sabiam que resíduos orgânicos podiam ser retornados ao solo , contribuindo para sua fertilidade. No entanto, só a partir de 1.920 , com Albert Howard, é que o processo passou a ser pesquisado cientificamente e realizado de forma racional. Nas décadas seguintes, muitos trabalhos científicos lançaram as bases para o desenvolvimento desta técnica , que hoje pode ser utilizada em escala industrial

A compostagem pode ser definida como uma bioxidação aeróbia exotérmica de um substrato orgânico heterogêneo, no estado sólido , caracterizado pela produção de CO₂ , água, liberação de substâncias minerais e formação de matéria orgânica estável.

Na prática , isto significa que a partir de resíduos orgânicos com características desagradáveis (odor, aspecto, contaminação por microrganismos patogênicos...) , o processo transforma estes resíduos em composto, que é um insumo agrícola , de odor agradável, fácil de manipular e livre de microrganismos patogênicos.

Os componentes orgânicos biodegradáveis passam por etapas sucessivas de transformação sob a ação de diversos grupos de microrganismos, resultando num processo bioquímico altamente complexo.

Sendo um processo biológico, os fatores, mais importantes, que influem na degradação da matéria orgânica são a aeração, os nutrientes e a umidade. A temperatura também é um fator importante, principalmente no que diz respeito à rapidez do processo de biodegração e à eliminação de patógenos, porém é resultado da atividade biológica. Os nutrientes, principalmente carbono e nitrogênio, são fundamentais ao crescimento bacteriano. O carbono é a principal fonte de energia e o nitrogênio é necessário para a síntese celular. Fósforo e enxofre também são importantes , porem seu papel no processo é menos conhecido. Os microrganismos têm necessidade dos mesmos micro nutrientes requeridos pelas plantas : Cu, Ni, Mo, Fe, Mg, Zn e Na são utilizados nas reações enzimáticas, porém os detalhes deste processo são pouco conhecidos.

O processo de compostagem pode ser simplificadaamente representado pelo esquema mostrado na Figura 1.1.

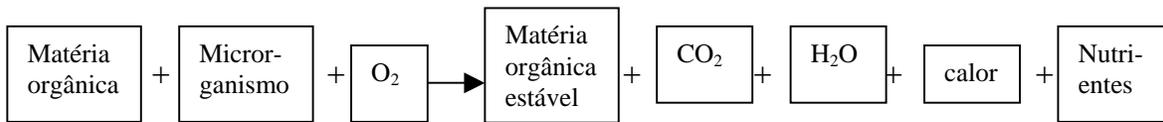


Figura 1.1 - Esquema simplificado do processo de compostagem

À medida em que o processo de compostagem se inicia, há proliferação de populações complexas de diversos grupos de microrganismos (bactérias, fungos , actinomicetos) , que vão se sucedendo de acordo com as características do meio. De acordo com suas temperaturas ótimas , estes microrganismos são classificados em psicrofílicos (0 - 20 °C) , mesófilos (15 - 43°C) e termófilos (40 - 85 °C). Na verdade estes limites não são rígidos e representam muito mais os intervalos ótimos para cada classe de microrganismo do que divisões estanques (Tabela 1.2).

Tabela 1.2 – Temperaturas mínimas, ótimas e máximas para as bactérias, em °C

Bactérias	Temperatura mínima	Temperatura ótima	Temperatura máxima
Mesófilas	15 a 25	25 a 40	43
Termófilas	25 a 45	50 a 55	85

Fonte: Institute for solid wastes of American Public Works Association , 1970

No início do processo há um forte crescimento dos microrganismos mesófilos. Com a elevação gradativa da temperatura, resultante do processo de biodegradação, a população de mesófilos diminui e os microrganismos termófilos proliferam com mais intensidade. A população termófila é extremamente ativa, provocando intensa e rápida degradação da matéria orgânica e maior elevação da temperatura , o que elimina os microrganismos patogênicos (Figura 1.2).

Quando o substrato orgânico for em sua maior parte transformado, a temperatura diminui, a população termófila se restringe, a atividade biológica global se reduz de maneira significativa e os mesófilos se instalam novamente . Nesta fase , a maioria das moléculas facilmente biodegradáveis foram transformadas, o composto apresenta odor agradável e já teve início o processo de humificação, típico da segunda etapa do processo, denominada maturação.

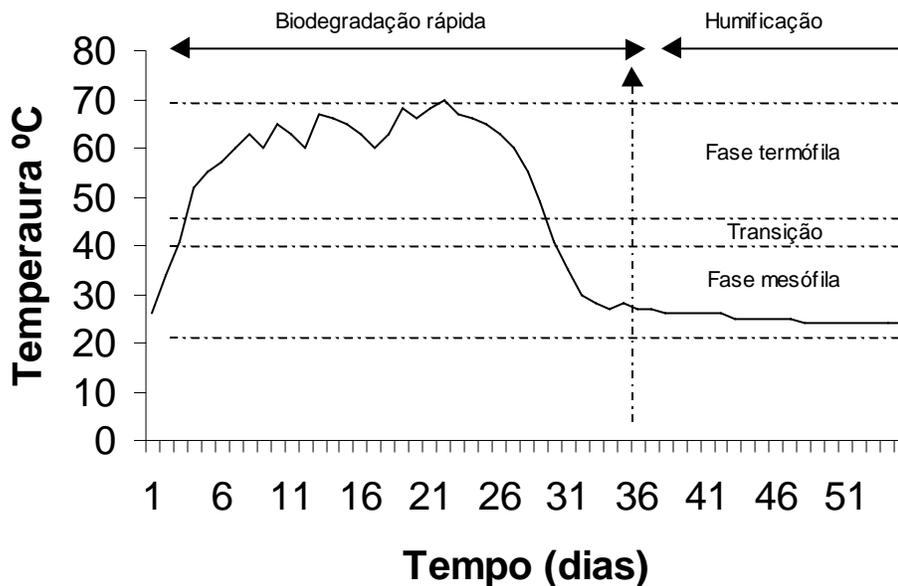


Figura 1.2. Exemplo genérico da evolução da temperatura de uma leira em compostagem

Estas duas fases distintas do processo de compostagem são bastante diferentes entre si. Na fase de degradação rápida, também chamada de bioestabilização, há intensa atividade microbiológica e rápida transformação da matéria orgânica. Portanto, há grande consumo de O_2 pelos microrganismos, elevação da temperatura e mudanças visíveis na massa de resíduos em compostagem, pois ela se torna escura e não apresenta odor agressivo. Mesmo com tantos sinais de transformação o composto não está pronto para ser utilizado. Ele só estará apto a ser disposto no solo após a fase seguinte, chamada de maturação.

Na fase de maturação a atividade biológica é pequena, portanto a necessidade de aeração também diminui. O processo ocorre à temperatura ambiente e com predominância de transformações de ordem química: polimerização de moléculas orgânicas estáveis no processo conhecido como humificação.

Estes conceitos são importantes, pois eles se refletem na própria concepção das usinas de compostagem. Como na fase de biodegradação rápida ocorre uma redução de volume do material compostado, conseqüentemente a área necessária para a fase de maturação é menor.

Durante a maturação, alguns testes simples permitem definir o grau de maturação do composto e portanto a liberação para seu uso. Ele pode então, se houver interesse, ser peneirado e acondicionado adequadamente para ser mais facilmente vendido e transportado.

Mas para que o processo de compostagem se desenvolva de maneira satisfatória, é necessário que alguns parâmetros físico-químicos sejam respeitados permitindo que os microrganismos encontrem condições favoráveis para se desenvolverem e transformarem a matéria orgânica.

1.3 -PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS FUNDAMENTAIS NO PROCESSO DE COMPOSTAGEM

1.3.1 Aeração.

Sendo a compostagem um processo aeróbio, o fornecimento de ar é vital à atividade microbiana, pois os microrganismos aeróbios têm necessidade de O_2 para oxidar a matéria orgânica que lhes serve de alimento.

Durante a compostagem, a demanda por O_2 pode ser bastante elevada e a falta deste elemento pode se tornar em fator limitante para a atividade microbiana e prolongar o ciclo de compostagem.

A circulação de ar na massa do composto é, portanto, de importância primordial para a compostagem rápida e eficiente. Esta circulação depende da estrutura e umidade da massa e também da tecnologia de compostagem utilizada.

A aeração também influi na velocidade de oxidação do material orgânico e na diminuição da emissão de odores, pois quando há falta de aeração o sistema pode tornar-se anaeróbio.

Seja qual for a tecnologia utilizada, a aeração da mistura é fundamental no período inicial da compostagem, na fase de degradação rápida, onde a atividade microbiana é intensa. Na fase seguinte, a maturação, a atividade microbiana é pouco intensa, logo a necessidade de aeração é bem menor.

O lodo é um resíduo de granulometria fina e quando está parcialmente desidratado, apresenta aspecto pastoso, o que dificulta a difusão do ar. Por esta razão, o lodo normalmente será misturado a outro resíduo, com granulometria mais grosseira, capaz de atuar como agente estruturante na mistura, permitindo assim a criação dos espaços vazios necessários à difusão do ar.

1.3.2. Temperatura.

A compostagem aeróbia pode ocorrer tanto em regiões de temperatura termofílica (45 a 85°C) como mesofílica (25 a 43°C).

Embora a elevação da temperatura seja necessária e interessante para a eliminação de microrganismos patogênicos, alguns pesquisadores observaram que a ação dos microrganismos sobre a matéria orgânica aumenta com a elevação da temperatura até 65°C e que acima deste valor o calor limita as populações aptas, havendo um decréscimo da atividade biológica.

A temperatura é um fator indicativo do equilíbrio biológico, de fácil monitoramento e que reflete a eficiência do processo. Se a leira, em compostagem, registrar temperatura da ordem de 40-60°C no segundo ou terceiro dia é sinal que o ecossistema está bem equilibrado e que a compostagem tem todas as chances de ser bem sucedida. Caso contrário, é sinal de que algum ou alguns parâmetros físico-químicos (pH, relação C/N, umidade) não estão sendo respeitados, limitando assim a atividade microbiana.

Depois de iniciada a fase termófila (em torno de 45°C), o ideal é controlar a temperatura entre 55 e 65 °C. Esta é a faixa que permite a máxima intensidade de atividade microbiológica. Acima de 65°C a atividade microbiológica cai e o ciclo de compostagem fica mais longo.

Atualmente, a aeração também é usada como meio de controlar a temperatura. Em certos casos o insuflamento de ar comprimido na massa do composto pode ser de 5 a 10 vezes maior do que o estritamente necessário à respiração microbiana, tendo assim a função de dissipar o calor liberado no processo.

1.3.3 Umidade

A água é fundamental para a vida microbiana.

No composto, o teor ótimo de umidade, de modo geral, situa-se entre 50 e 60%. O ajuste da umidade pode ser feito pela criteriosa mistura de componentes ou pela adição de água. Na prática se verifica que o teor de umidade depende também da eficácia da aeração, das características físicas dos resíduos (estrutura, porosidade). Elevados teores de umidade (>65%) fazem com que a água ocupe os espaços vazios do meio, impedindo a livre passagem do oxigênio, o que poderá provocar aparecimento de zonas de anaerobiose. Se o teor de umidade de uma mistura é inferior a 40% a atividade biológica é inibida, bem como a velocidade de biodegradação.

Porém, como há perdas de água devido à aeração, em geral, o teor de umidade do composto tende a diminuir ao longo do processo. O teor de umidade é um dos parâmetros

que devem ser monitorados durante a compostagem para que o processo se desenvolva satisfatoriamente.

Os lodos a serem compostados devem passar previamente por processo de desaguentamento ou desidratação para eliminar o excesso de água.

1.3.4. Relação C/N

Os microrganismos necessitam de carbono, como fonte de energia, e de nitrogênio para síntese de proteínas. É por esta razão que a relação C/N é considerada como fator que melhor caracteriza o equilíbrio dos substratos.

Teoricamente, a relação C/N inicial ótima do substrato deve se situar em torno de 30. Na realidade, constata-se que ela pode variar de 20 a 70 de acordo com a maior ou menor biodegradabilidade do substrato. Tanto a falta de nitrogênio quanto a falta de carbono limita a atividade microbiana. Se a relação C/N for muito baixa pode ocorrer grande perda de nitrogênio pela volatilização da amônia. Se a relação C/N for muito elevada os microrganismos não encontrarão N suficiente para a síntese de proteínas e terão seu desenvolvimento limitado. Como resultado, o processo de compostagem será mais lento. Independentemente da relação C/N inicial, no final da compostagem a relação C/N converge para um mesmo valor, entre 10 e 20, devido à perdas maiores de carbono que de nitrogênio, no desenvolvimento do processo.

O lodo é um resíduo rico em nitrogênio, apresentando relação C/N entre 5,0 e 11,0. Ele necessita, portanto de um resíduo complementar rico em carbono e pobre em nitrogênio, para que a mistura, criteriosamente determinada, apresente relação C/N em torno de 20 ou 30.

1.3.5. Estrutura

Quanto mais fina é a granulometria, maior é a área exposta à atividade microbiana, o que promove o aumento das reações bioquímicas, visto que aumenta a área superficial em contato com o oxigênio.

Alguns autores obtiveram condições ótimas de compostagem com substratos apresentando de 30 a 36% de porosidade.

De modo geral, o tamanho das partículas deverá estar entre 25 e 75 mm, para ótimos resultados.

Como o lodo de esgoto normalmente apresenta granulometria muito fina, haveria dificuldade de realizar o processo de compostagem somente com este material, pois fatalmente apresentaria problemas relativos à aeração devido à falta de espaços intersticiais entre as partículas. Esta é uma das principais razões para se combinar o lodo com outro resíduo de granulometria mais grossa, o que confere estrutura porosa à mistura a ser compostada.

1.3.6. pH

É fato conhecido que níveis de pH muito baixos ou muito altos reduzem ou até inibem a atividade microbiana.

Quando são utilizadas misturas com pH próximo da neutralidade, o início da compostagem (fase mesófila) é marcado por uma queda sensível de pH, variando de 5,5 a 6,0, devido à produção de ácidos orgânicos.

Quando a mistura apresentar pH próximo de 5,0 ou ligeiramente inferior há uma diminuição drástica da atividade microbiológica e o composto pode não passar para a fase termófila.

A passagem à fase termófila é acompanhada de rápida elevação do pH, que se explica pela hidrólise das proteínas e liberação de amônia. Assim, normalmente o pH se mantém alcalino (7,5-9,0), durante a fase termófila.

De qualquer forma, e principalmente se a relação C/N da mistura for conveniente, o pH geralmente não é um fator crítico da compostagem.

Como o pH dos lodos de esgotos sanitários geralmente é próximo de 7,0, o processo de compostagem normalmente se desenvolve muito bem com este material, mesmo quando misturado com bagaço de cana, resíduos de podas de árvores, cascas do processamento de algodão e outros.

Capítulo 2 – TIPOS DE BIOSÓLIDOS GERADOS E RESÍDUOS ESTRUTURANTES

2.1- Sistemas de tratamento de esgotos e tipos de biossólidos gerados

Sendo um processo biológico, o desenvolvimento da compostagem é bastante influenciado pelas características dos resíduos utilizados. Como o lodo de esgoto apresenta composição e propriedades muito diferentes em função das tecnologias de tratamento de esgotos utilizadas, serão abordadas, neste ítem, as principais características dos lodos gerados em diversos sistemas de tratamento de esgotos.

O tratamento do esgoto processa-se através de fenômenos físicos, químicos e biológicos.

Entre as classificações propostas é comum, por questão didática, usar a que se baseia no grau de redução dos sólidos em suspensão e na demanda bioquímica de oxigênio proveniente da eficiência de uma ou mais unidades de tratamento.

Desta forma, o tratamento pode abranger níveis tecnicamente denominados de tratamento preliminar, tratamento primário, secundário ou terciário.

Tratamento preliminar: o tratamento preliminar destina-se a remover por ação física o material grosseiro e uma parcela das partículas maiores em suspensão no esgoto. Geralmente o material grosseiro (semelhante a lixo) é retido por grades, enquanto que as partículas em suspensão, são retidas por caixa de areia. Na caixa de areia ficam retidas, por sedimentação, as partículas minerais pesadas com predominância de areia. Normalmente o tratamento preliminar fica restrito ao uso de grade e caixa-de-areia. O resíduo gerado nesta fase deve ser disposto em aterro sanitário e jamais ser misturado ao lodo.

Tratamento Primário: O tratamento primário, além de incluir o tratamento preliminar, remove por ação física uma parcela a mais das partículas em suspensão no esgoto através da passagem da fase líquida, em baixa velocidade, em um decantador. No decantador algumas partículas depositam-se no fundo, onde constituem o lodo primário, e outras ascendem para a superfície líquida, formando a camada de espuma. A figura 2.1 apresenta um esquema de uma estação de tratamento primário de esgoto.

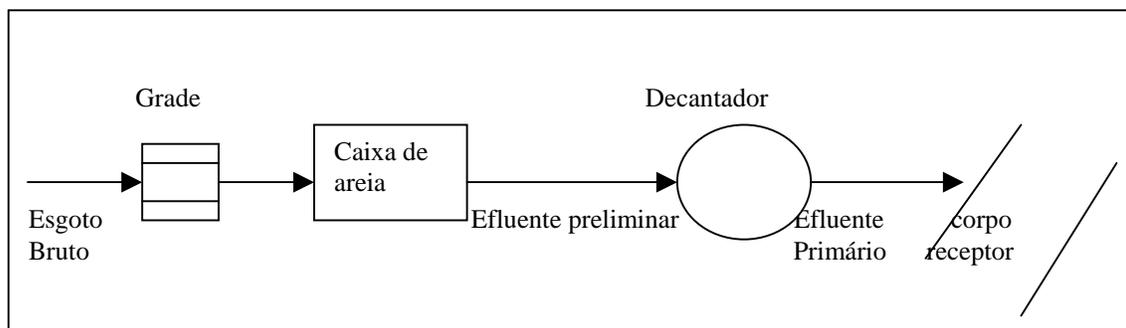


Figura 2.1. Esquema de uma estação de tratamento primário de esgoto, constituída de grade, caixa de areia e decantador primário.

O lodo gerado no decantador primário está, portanto muito próximo do material fecal inicial. Trata-se de um lodo altamente instável, com grande potencial de fermentação e grande problema de odor. Em geral, o lodo primário passa por um processo de estabilização biológica, sendo a digestão anaeróbia a alternativa mais utilizada.

Tratamento secundário: é um processo biológico de tratamento que, a depender de sua modalidade, pode atuar sobre o efluente primário, sobre o efluente preliminar ou, até mesmo, sobre o esgoto bruto apenas livre de material grosseiro. No tratamento biológico, o mecanismo mais importante para a remoção do material orgânico do esgoto é o metabolismo bacteriano.

As ETEs com tratamento biológico diferenciam-se entre si normalmente pelos tipos de unidades que promovem esse tratamento: filtro biológico, tanque de lodo ativado, valo de oxidação, carrossel, lagoa aerada, lagoa de estabilização, reator anaeróbio. A Figura 2.2 apresenta um esquema de uma estação de tratamento secundário de esgoto.

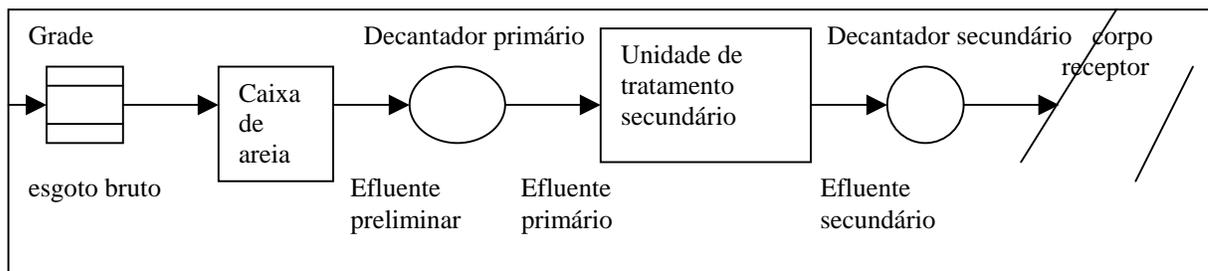


Figura 2.2 - Esquema de uma estação de tratamento secundário de esgoto, onde o efluente primário é encaminhado à unidade de tratamento secundário, que pode ser um filtro biológico ou um tanque de lodo ativado precedendo o decantador secundário.

O filtro biológico e o tanque de lodo ativado, destinados tão somente a receber esgoto primário, produzem efluente que deve passar por um decantador denominado secundário, onde se sedimentam os flocos resultantes do processo biológico, como pode ser visto na Figura 2.2. O valo de oxidação, o carrossel e a lagoa de estabilização facultativa podem até receber efluente preliminar, dispensando qualquer tipo de decantador. O reator anaeróbio de fluxo ascendente, atualmente muito pesquisado e utilizado, também dispensa a utilização de qualquer tipo de decantador, gerando um lodo já estabilizado anaerobiamente. Já a lagoa aerada dispensa o decantador primário, mas requer a presença de uma unidade de decantação secundária. O grau de estabilização do lodo secundário depende da tecnologia empregada. No caso dos lodos ativados convencionais, o lodo retido no decantador secundário é rico em bactérias, formando um lodo altamente instável, com grande potencial de odores agressivos, sendo então necessária sua

estabilização. Algumas variantes do processo de lodos ativados, como valo de oxidação, sistema carrossel e reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo, retêm o lodo por mais tempo, estabilizando-o na própria unidade.

Tratamento terciário: o tratamento terciário (avançado) destina-se a remover do efluente secundário as substâncias que o tornam impróprio para determinado fim ou para ser lançado num manancial de água. Um exemplo de tratamento terciário é a remoção de partículas diminutas, em suspensão e dissolvidas, minerais e orgânicas presentes no efluente secundário a fim de transformá-lo em água potável. O exemplo mais comum é a remoção de nitrogênio e do fósforo presentes no efluente secundário, para que este não favoreça a proliferação de algas capazes de causar odor e sabor na água do corpo receptor.

A sedimentação de partículas pode ser acelerada se ao efluente for adicionado um coagulante. Este, através de reações químicas, produz flocos que acabam por precipitar-se no fundo dos decantadores. Logo, a coagulação, ou seja, a precipitação química, aumenta a eficiência da decantação primária ou secundária. É, no entanto, de uso restrito sobretudo por ser dispendiosa. Atualmente algumas ETEs têm utilizado esta técnica para ampliar sua capacidade de tratamento, sem ampliação das unidades instaladas.

A precipitação química também pode decorrer da aplicação de um coagulante no efluente primário, impondo a necessidade de instalação de um decantador para disposição de flocos. Todavia, não é considerado tratamento secundário por ser incapaz de degradar matéria orgânica em dissolução, provocando apenas a transferência de parte desta matéria orgânica para o material precipitado.

O lodo físico-químico é extremamente instável e difícil de ser desidratado.

A Tabela 2.1 apresenta uma síntese dos principais tipos de resíduos removidos nos sistemas de tratamento de esgotos sanitários, e suas principais características.

Tabela 2.1 - Principais tipos de resíduos removidos em ETEs de esgotos sanitários e suas características.

Tipo de resíduo	Características
Resíduos retidos nas grades	Sólidos grosseiros; pedaços de madeira, papel etc.
Sedimentos de caixa de areia	Material mineral: areia, terra, partículas orgânicas ligadas às minerais
escuma	Material sobrenadante dos decantadores ou de alguns tipos de

	reatores, rico em óleos e graxas, sólidos de baixa densidade. Não deve ser misturado ao lodo, caso este venha a ser compostado ou utilizado na agricultura.
Lodo primário	Lodo obtido por sedimentação do esgoto no decantador primário. Normalmente cinza e na maioria dos casos de odor ofensivo. Pode ser digerido facilmente por vários processos. Normalmente é encaminhado a um digestor anaeróbio.
Lodo secundário (processo lodos ativados)	Apresenta geralmente aparência floculada e com tons marrons. Se a cor é mais escura, as condições do meio se aproximam da anaerobiose. Tende à decomposição anaeróbia devido ao excesso de matéria orgânica. Pode ser digerido facilmente sozinho ou misturado com lodo primário, no digestor
Lodo digerido aeróbio (ativado e primário)	Apresenta cor marrom escura e aparência floculada, Odor inofensivo e é fácil de ser drenado.
Lodo digerido anaeróbio (ativado e primário)	Apresenta cor marrom escura ou preta. Se for bem digerido não apresenta odor ofensivo. Também é fácil de ser desidratado.

Os vários tipos de lodos apresentam características físico-químicas diferentes e, caso sejam compostados, estas características terão grande influência no nível de atividade microbológica do processo. A Tabela 2.2 mostra as principais características físico-químicas de alguns tipos de lodo gerado nos diversos sistemas de tratamento, bem como do resíduo fecal bovino, que é muito utilizado em compostagem rural, a título de comparação.

Tabela 2.2 - Principais características físico-químicas dos lodos gerados em ETEs mais usuais, bem como do resíduo fecal bovino, que interferem no processo de compostagem.

Tipo de lodo	PH	%H₂O	Sólidos fixos - % sólidos totais	C	N	C/N	P	Tipo de ETE
Lodo primário	6,2	99	11	33	4,5	7,3	3,1	Lodos ativados convencional
Lodo ativado	7,0	99	13	32	6,0	5,3	2,9	Lodos ativados convencional
Lodo digerido (primário + ativado)	7,0	91	40	25	3,1	8,0	5,6	Lodos ativados convencional
Lodo anaeróbio - RALF	6,5	96	55	22	2,3	9,5	0,95	Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manto de lodo
Lodo ativado - aeração prolongada	6,9	98	37	32	4,9	6,5	3,7	Lodos ativados -Sistema carrossel
Lodo de lagoa de estabilização	6,7	94	53	27	3,2	8,4	0,6	Lagoa anaeróbia primária
Lodo anaeróbio - RALF precedido de decantador	7,9	70	48	26	5,0	5,2	0,8	Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manto de lodo precedido de decantador
Material fecal bovino	8,0	80	10	45	4,0	11,2	0,7	-----

Fonte: Silva & Fernandes (1998); Fernandes et al (1993); Fernandes et al (1996)

A influência das características do lodo no processo de compostagem está vinculada essencialmente aos seu teor de matéria orgânica. O lodo fresco (lodo do decantador primário) ou o lodo ativado apresentam elevada fração de matéria orgânica facilmente degradável, portanto com elevado potencial de fermentação. Estes tipos de lodos contêm substratos que podem acelerar a atividade microbiológica durante a compostagem. Porém, por serem muito instáveis podem gerar problemas de odores e atração de vetores. Além disso, estes lodos têm pouca aptidão à desidratação, fator que torna problemática sua compostagem. No extremo oposto, os lodos excessivamente mineralizados, já tiveram a maior parte de seu conteúdo orgânico biodegradado, restando apenas as moléculas de degradação mais difícil. Estes lodos não apresentam problema de odor forte ou atração de vetores, porém o desempenho da atividade microbiológica, na compostagem, pode ficar limitado por falta de matéria orgânica rapidamente degradável.

Outra característica importante do lodo é seu teor de umidade.

O lodo formado no fundo dos decantadores possui elevado teor de água. O do decantador primário geralmente tem, em média, 95% de água e o do decantador secundário 98 a 99,5%. Torna-se conveniente o tratamento do lodo com vista à sua estabilização e /ou redução do seu teor de umidade. A escolha do processo depende do tipo, porte e da localização de ETE, bem como das características e do destino que se pretende dar ao lodo.

2.2 – Processamento do lodo

Geralmente o lodo produzido no decantador primário e secundário é encaminhado a um digestor anaeróbio para tratamento e posteriormente a um processo de desidratação, para a redução de umidade. Nas ETEs que dispensam a utilização de decantadores, o lodo produzido é somente adensado antes de ser encaminhado para uma das alternativas de desidratação.

A retirada de água do lodo é um processo fundamental para a redução de seu volume, diminuindo assim os custos de transporte. Além da redução de volume, o grau de desidratação influi nas características físicas do lodo, conferindo-lhe consistência líquida, pastosa ou sólida. Essas características certamente influirão de maneira decisiva na sua manipulação, transporte e destino final.

Os processos de desidratação podem ser naturais ou mecânicos. Os naturais, constituídos, basicamente, de leitos de secagem e lagoa de lodo, são bastante adequados para pequenos sistemas situados em locais com clima semelhante ao do Brasil. Os processos mecanizados começam a ser mais vantajosos para sistemas com produções maiores de lodo, com restrição de espaço ou com clima desfavorável aos processos naturais de secagem.

2.2.1 - Desidratação natural

Para que o sistema de desidratação natural possa ser empregado é necessário que o lodo esteja bem digerido, para facilitar sua drenagem e não provocar maus odores.

a) leito de secagem

Os leitos de secagem são caixas com fundo falso, ou outro sistema de drenagem, sobre o qual é colocada uma camada de britas, seguida de uma camada de areia.

Sobre a areia normalmente são assentados tijolos perfurados capazes de manter a estabilidade mecânica do sistema. A redução de umidade se processa com a drenagem e evaporação da água durante o período de secagem.

O lodo ao ser removido apresenta teor de sólidos de 40 a 75% que depende das condições climáticas e do período de secagem. Os ciclos de secagem variam de 25 a 35 dias.

No Brasil as taxas de carga variam de 15 a 30 equivalente habitante/m² de leito, dependendo do sistema de tratamento de esgoto.

Para a utilização do lodo na compostagem, caso a desidratação avance até produzir lodo sólido, poderá haver falta de umidade na mistura a ser compostada.

O lodo pode ser extraído do leito de secagem no estado pastoso, porém a operação fica mais difícil.

b) lagoas de lodo

O sistema de disposição de lodo em lagoas resume-se no emprego de reservatórios feitos em terra. Normalmente não contam com sistema de drenagem de fundo. A secagem ocorre pela evaporação. As características construtivas e operacionais das lagoas de lodo retardam os efeitos dos processos de secagem, caracterizando-as como unidade de longo período de secagem em comparação com os leitos de secagem. Os principais fatores que interferem são: grandes profundidades, carregamento contínuo ou de pequenos períodos entre cada alimentação, lodo úmido lançado diretamente no lodo em processo de secagem, sistema de drenagem pouco eficiente, entre outros.

2.2.2 - Sistemas de desidratação mecânicos

Os sistema de desidratação mecânicos necessitam de alguns pré-requisitos para que o lodo seja convenientemente desidratado. Normalmente, o lodo após passar por um adensador, é encaminhado para o condicionamento químico, que deve ser adaptado a cada tipo de lodo, em função da sua composição físico-química, estrutural e da técnica de desidratação a ser utilizada. Os processos mecânicos mais usuais são os seguintes:

a) centrifugação

A desidratação do lodo por centrifugação é feita com base na sedimentação dos sólidos que é aumentada pelo movimento de rotação . As velocidades de rotação variam de 3.000 a 6.000 rpm e o teor de sólidos do material retirado é de 20 a 30%. O uso de polímeros pode melhorar sua eficiência e qualidade do líquido drenado. Para cada tipo de lodo e do

destino final estipulado para este lodo, deve-se determinar , em função do teor de sólidos pretendido: a taxa de alimentação da centrífuga, o uso ou não de polímeros, a dosagem e tipo de polímeros quando necessário, a rotação a ser empregada. As centrífugas têm sido uma das alternativas mais escolhidas para a desidratação de lodos, principalmente devido sua facilidade de operação e boa consistência do lodo desidratado, podendo ser manipulado como sólido. A SANEPAR (ETE Santa Quitéria - Curitiba) e CAESB (ETE Sul – Brasília) estão utilizando este tipo de equipamento em algumas de suas ETES.

a) Prensa desaguadora contínua

As prensas desaguadoras retiram a água do lodo combinando drenagem da água livre na primeira fase da esteira, seguida de compressão e cisalhamento .do lodo entre duas esteiras. A largura da esteira varia de 0,5 a 3,5 m. O teor de sólidos obtido no sistema varia de 15 a 20%, o que lhe confere uma consistência pastosa. O tipo de lodo e do condicionador químico, a pressão aplicada, a porosidade da cinta desaguadora, são fatores que influem na performance da prensa. A CAESB (ETE Norte em Brasília) e a SANEPAR (ETE Belém- Curitiba) operam sistemas deste tipo.

c) Filtros Prensa

Os filtros prensa são constituídos por várias placas filtrantes, que uma vez preenchidas com lodo, são comprimidas hidraulicamente, o que força a saída da água. As pressões de operação variam de 100 a 250 psig e o tempo de compressão varia de 30 a 60 minutos. O lodo deve ser necessariamente condicionado antes da compressão e a concentração de sólidos obtida no sistema varia de 35 a 50% . A SABESP opera um filtro deste tipo na ETE Barueri em São Paulo.

d) Secagem térmica de lodos.

Esta tecnologia permite obter teor de sólidos da ordem de 90 a 95%, que é obtido através da evaporação da água com introdução de energia térmica. Esta alternativa seria a menos adequada para ser utilizada, quando o destino do lodo é para compostagem, pois não há necessidade de retirada de água neste nível.

A Tabela 2.3 apresenta os teores médios de sólidos, estado físico e equipamentos de transporte necessários para os processos mais usuais de desidratação de lodos

Tabela 2.3- Teores médios de sólidos, estado físico e equipamentos de transporte necessários para os processos mais usuais de desidratação de lodos.

Sistema de desaguamento ou desidratação	Teor de sólidos do lodo (%)	Estado físico do lodo	Equipamento de transporte
Espessamento por gravidade	2-4	líquido	Bombeamento, tubulações, caminhões tanque

Espessamento por flotação	3-8	líquido	Bombeamento, tubulações, caminhões tanque
Prensa desaguadora contínua (belt press)	15-20	pastoso	Caminhões, caçambas estanques
Centrífuga tipo decanter	20-25	Pastoso-sólido	Caminhões e caçambas estanques
Filtro prensa	25-45	sólido	Caminhões e caçambas
Leito de secagem	40-80	sólido	Caminhões e caçambas

O tipo de sistema de desidratação do lodo terá consequências muito importantes para a operacionalização de seu destino final, pois define:

- O estado físico do lodo e sua consequente facilidade de transporte, estocagem e mistura com outros resíduos
- O teor de sólidos, que influi nos custos de transporte e na obtenção da umidade ótima para o início do processo de compostagem.

2.3 – Resíduos estruturantes

Do que foi exposto anteriormente, pode-se concluir que o lodo de esgoto não possui características que o tornam um resíduo capaz de ser compostado sozinho. É necessário misturá-lo com outro resíduo, de características complementares, para que a mistura, racionalmente determinada, apresente as condições ótimas para a compostagem.

Os agentes estruturantes, ou resíduos estruturantes, têm a função de conferir integridade estrutural à mistura a ser compostada. No caso da compostagem do lodo, o agente estruturante também tem a função de absorver o excesso de umidade e equilibrar a relação C/N da mistura.

Além disso, o resíduo estruturante fornece carbono para os microrganismos do processo de compostagem. Esta função é variável de acordo com o tipo de resíduo utilizado: alguns resíduos como as folhas trituradas e restos de legumes apresentam grande fração de carbono disponível, enquanto os resíduos de serrarias, por exemplo, ricos em lignina, apresentam menor fração de carbono disponível aos microrganismos.

De modo geral, os resíduos vegetais (Tabela 2.4) são os mais importantes agentes estruturantes: resíduos de podas de árvores, serragem de madeira, palha, cascas de cereais, bagaço de cana-de-açúcar, são os resíduos mais utilizados.

Tabela 2.4 - Características de alguns resíduos vegetais utilizados como agentes estruturantes na compostagem do lodo

Resíduo	P H	H ₂ O %	Sólidos fixos (% em relação aos sólidos totais)	P %	N %	C %	C/N
Resíduo de podas de árvores	6,9	30	9	0,09	1,1	51	46
Bagaço de cana de açúcar	3,7	20-40	3	0,1	0,20	47	235
Serragem de madeira	8,0	30	2	0,50	0,10	49	490
Sabugo de milho	7,5	10	7	0,30	0,40	46	115
Palha de trigo	7,5	6	5	0,50	0,50	43	86
Cascas de café	5,1	10	5	0,08	1,20	46	38

Fonte : Silva et Fernandes, 1998; Fernandes et Soares, 1992; Fernandes et al, 1988)

Os resíduos citados na Tabela 2.4 são apenas ilustrativos, pois vários outros tipos de resíduos vegetais podem ser utilizados. De modo geral, para a compostagem do lodo de esgoto, um bom agente estruturante deve apresentar:

- Granulometria que confira boa integridade estrutural à massa em compostagem , facilitando a difusão do ar
- Baixo teor de umidade e capacidade para absorver o excesso de umidade do lodo
- Baixo teor de nitrogênio para permitir equilibrar a relação C/N da mistura final

Além destas características intrínsecas ao resíduo, a escolha do agente estruturante em um determinado projeto de usina de compostagem , também deve considerar alguns aspectos práticos, como a disponibilidade do resíduo, distâncias de transporte e características desejadas no produto final.

Capítulo 3 – CONTAMINANTES DOS BÍOSSÓLIDOS

Os principais riscos ambientais relacionados com a reciclagem do lodo no meio ambiente são representados pelo seu conteúdo de metais, de compostos orgânicos, de microrganismos patogênicos e pelos riscos de poluição das águas superficiais e subterrâneas.

As características qualitativas e quantitativas do lodo estão relacionadas com a densidade populacional, tipo de urbanização, hábitos sanitários, condições ambientais, estação do ano, perfil de saúde da comunidade que gera o lodo e tipo de sistema de tratamento existente.

Quando se pretende fazer a reciclagem agrícola do lodo de esgoto, são reintroduzidos ao ambiente determinadas substâncias e microrganismos que devem ter sua influência avaliada na qualidade ambiental e, conseqüentemente na saúde humana.

A dinâmica de cada elemento químico deve ser analisada frente às dosagens consideradas tóxicas e aos diferentes níveis de exposição. Os agentes patogênicos devem ser analisados segundo seus diferentes graus de atividade biológica e suas concentrações, que definem a sua virulência, visto que associada às condições do meio e às susceptibilidades dos hospedeiros, pode se refletir em algumas alterações na saúde das populações.

3.1 – Metais pesados

São considerados como metais pesados os elementos que possuem massa específica maior que $6,0 \text{ g/cm}^3$. No entanto, o termo “metal pesado” é, às vezes, utilizado indiscriminadamente para os elementos químicos que contaminam o meio ambiente e podem provocar diferentes níveis de dano à biota. Os principais elementos químicos enquadrados neste conceito são: Ag, As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se e Zn. Estes elementos são encontrados naturalmente no solo em concentrações que variam de μg a mg.kg^{-1} , as quais são inferiores àquelas consideradas tóxicas para diferentes organismos vivos. Dentre eles As, Co, Cr, Cu, Se e Zn são essenciais aos organismos vivos.

Os teores de metais pesados solúveis no solo são geralmente baixos. Entretanto, o emprego de fungicidas, fertilizantes minerais e esterco de animais na agricultura e o descarte de resíduos urbanos, tais como lixo e lodo de esgoto e industriais no solo, podem elevar a concentração de metais pesados no solo a níveis capazes de causar danos à biota.

Das fontes potenciais de contaminação do solo, os resíduos urbanos e industriais apresentam grande variação nos teores de metais pesados, os quais estão intimamente relacionados à atividade econômica regional.

Os metais pesados presentes no lodo de esgoto são provenientes principalmente dos efluentes industriais que são lançados nas redes coletora públicas.

A Tabela 3.1 apresenta os principais metais pesados encontrados nos lodos sanitários provenientes de atividades industriais

Tabela 3.1 - Principais metais pesados encontrados nos lodos sanitários provenientes de atividades industriais

Metal	Origem	Micronutriente necessário	Fitotóxico acima de certos limites
Cádmio (Cd)	Indústrias de tratamento de superfícies metálicas, plásticos, fabricação de radiadores, borracha, pigmentos, etc	Não	Sim
Cobre (Cu)	Canalizações de água quente, fábrica de fios elétricos, radiadores de automóveis e tratamento de superfícies metálicas	Sim	Sim
Zinco (Zn)	Produtos farmacêuticos, fábrica de tintas, borracha, pilhas elétricas, galvanização	Sim	Sim
Níquel (Ni)	Fábrica de ligas de aço especiais, recobrimento de superfícies metálicas por eletrólise; hidrogenação de óleos e substâncias orgânicas, tintas, cosméticos	Não	Sim
Mercúrio (Hg)	Produtos farmacêuticos, fungicidas, aparelhos elétricos e eletrônicos, tintas, pasta de papel, fabricação de cloretos de vinil	Não	Sim
Cromo (Cr)	Curtumes, fabricação de ligas especiais de aço, tratamento de superfícies metálicas	Sim	Sim
Chumbo (Pb)	Fabricação de baterias, tintas, escoamento pluvial de vias públicas, canalizações	Não	Sim
Selênio (Se)	Fabricação de tintas e pigmentos, vidro, indústria de semicondutores, inseticidas, ligas metálicas	sim	Sim

Fonte: ANRED, Paris, 1988

O lodo de ETEs que recebem apenas efluentes domésticos contém pouca quantidade de metais pesados, provenientes da própria natureza dos resíduos e das canalizações. Porém, podem ocorrer ligações clandestinas de pequenas fontes tais como: laboratórios fotográficos, fábricas de baterias, tintas de cromagem e outras.

Os metais pesados podem provocar graves problemas para a saúde das pessoas que os consumirem durante período prolongado ou em quantidades elevadas, pois são cumulativos no organismo.

A tabela 3.2 mostra os efeitos dos metais pesados sobre a saúde humana

Tabela 3.2 - Síntese dos efeitos dos principais metais pesados sobre a saúde humana

Metais pesados	Efeitos sobre a saúde humana
Cádmio	Provoca desordem gastrointestinal grave, bronquite, efizema , anemia e cálculo renal
Chumbo	Provoca cansaço, ligeiros transtornos abdominais, irritabilidade e anemia
Cromo	Em doses baixas causa irritação nas mucosas gastrointestinais, úlcera e inflamação da pele. Em doses altas causa doenças no fígado e nos rins, podendo levar à morte.
Mercúrio	Causa transtornos neurológicos e renais, tem efeitos tóxicos nas glândulas sexuais, altera o metabolismo do colesterol e provoca mutações.

Fonte: Barros et al 1996

A Tabela 3.3 mostra os níveis de metais pesados detectados em alguns materiais utilizados no solo bem como em lodos de diversas Estações de Tratamento de Esgotos.

Tabela 3.3 - Teor de metais pesados detectados em alguns materiais utilizados no solo e em biossólidos de diversas ETEs. (mg.kg⁻¹)

material	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	referência
Lodo de esgoto (USA)	2-1.100	-	-	84-10.400	12-2.800	800-26.000	72-16.400	-----	Tiller, 1989 citado Miyasawa (dados não publicados-1998)
Lodo ETE Sul Londrina – RALF	1,6	12,4	62,8	725,0	67,3	208,2	207,0	----- -	SILVA & FERNANDES (1998) não publicado
Fertilizante fosfatado	0,1-170	1-12	66-245	1-300	7-38	7-225	50-1450		Alloway, 1993, citado Miyasawa (dados não publicados-1998)
calcário	0,04-0,1	0,4-3	10-15	2-125	10-20	20-1.250	10-450	-----	Alloway, 1993 citado Miyasawa (dados não publicados-1998)
Lodo ETE Norte Londrina RALF	0,01	17,8	70,4	282,00	29,2	101,0	1041,00	-----	SILVA & FERNANDES (1998)
Lodo biodigestor da ETE Norte Londrina	2,11	11,7	66,3	196,00	20,9	72,0	710,00	-----	SILVA & FERNANDES (1998)

Lixo urbano	2	----	26	113	12	135	235	-----	Rao & Shantaram, 1995, citado por Miyasawa et al
Composto com lodo	-----	-----	60	78	-----	38	89	-----	Fernandes et al, 1993
Esterco de suíno	0,58	4,1	19,3	230,0	4,0	19,6	1670	-----	Miyasawa et al dados não publicados
Esterco de aves	0,33	2,7	15,9	72,8	2,6	5,9	151	-----	Miyasawa et al dados não publicados
Lodo esgoto ETE Belém -Curitiba	Não detectado	-----	178,0	439,0	73,0	123,0	824,0	1,0	SANEPAR, 1997
Lodo esgoto de São Paulo - Barueri 1996	9-38	-----	334-1005	485-1706	239-600	101-350	595-2506	0-6,8	Santos & Tsutiya, 1997
Lodo esgoto São Paulo- Suzano	1-85	-----	859-3486	450-1215	124-269	173-500	839-2846	2-55	Santos & Tsutiya, 1997
Lodo esgoto de Brasília	<10	-----	54	-----	34	50	-----	4	Ludovice, M. L. 1996
Composto lodo e resíduo de podas de	0	10,0	48,2	240	29,0	105,6	836,0	-----	Fernandes & Silva, 1999 Dados não publicados

árvores									
Recomenda do EPA	39	-----	1200	1500	420	300	2800	17	EPA, citada Ludovice, M. L. 1996
Teto máximo estabelecido pela EPA	85	-----	3000	4300	420	840	7500	57	EPA, citada Ludovice, M. L. 1996
Recomenda do SANEPAR	20	-----	1000	1000	300	750	2500	16	SANEPAR, 1997

Diante deste fato reforça-se que é necessário um constante monitoramento e quando necessário, proceder a identificação dos agentes que possam estar lançando metais pesados nos sistemas coletores.

A possibilidade de contaminação das plantas e do lençol freático, devido a utilização de resíduos orgânicos contendo metais pesados, é uma das principais preocupações da humanidade. Por isso, há intensa investigação sobre a complexação e precipitação de metais pesados no solo, visando minimizar a sua movimentação através do perfil do solo.

O comportamento químico dos metais no solo é bastante complexo e influenciado por diferentes tipos de reações, tais como adsorção, complexação, precipitação, oxidação e redução, que definem a biodisponibilidade desses elementos para as plantas, a solubilidade e lixiviação nos solos e, conseqüentemente, o seu potencial de risco para a saúde humana e para o meio ambiente (EPA, 1995).

Os metais pesados podem também interferir na dinâmica e ecologia geral dos microrganismos em habitantes naturais.

O risco associado aos metais pesados do lodo está principalmente ligado ao fato do solo ser capaz de armazenar estes metais. Embora os metais pesados sejam cumulativos no solo, diversos fatores interferem na dinâmica da sua disponibilidade tais como o pH, a capacidade de troca catiônica (CTC), a textura e o teor de matéria orgânica. Desta forma, dependendo das condições ambientais, os metais podem estar presentes no solo em formas não disponíveis para as plantas. Neste caso, a transferência dos metais, para a cadeia alimentar, dependerá das características de cada solo e do tipo de planta, visto que as espécies vegetais têm capacidades variáveis de absorção de metais.

Todos os metais pesados, nutrientes ou não, formam compostos pouco solúveis com uma série de ânions facilmente encontrados no solo, tais como: carbonato, fosfato e silicato. Entretanto, o fator principal de imobilização desses metais é a formação de complexos polidentados (quelatos) com os componentes húmicos do solo. Alguns autores, inclusive, classificam as zonas poluídas por metais pesados com base no teor de matéria orgânica das mesmas. Segundo eles, um solo é considerado

poluído quando o teor de metais pesados do mesmo atinge níveis 3 a 5 vezes superiores aos teores originais, para solos onde o teor de húmus está entre 1 a 1,5%; e 5 a 20 vezes superiores aos teores originais, quando o teor de húmus está entre 3 e 4%.

A compostagem realizada com lodo de esgoto favorece o controle da toxicidade dos metais pesados, pois na fase de maturação ocorre a formação de húmus.

De modo geral, os critérios para a definição de uma legislação que limite os teores de metais pesados no composto devem considerar a qualidade do composto produzido, o uso que se pretende dar ao composto, além de levar em conta o tipo de solo, cultura, clima e todas as relações e equilíbrios dinâmicos envolvidos, a curto, médio e longo prazo, o que ainda precisa ser melhor estudado.

O manejo dos solos que promovam alterações de pH, como por exemplo a adição de calcário, e alterações no teor de matéria orgânica, pela adição de esterco de animais ou adubação verde, podem alterar a disponibilidade de metais para as plantas, tornando os metais pouco solúveis ou induzindo a formação de complexos metálicos estáveis de baixa solubilidade.

O teor de metais pesados no lodo deve ser monitorado na estação de compostagem. O Brasil ainda não tem uma normatização a este respeito, e na sua falta, o monitoramento da qualidade do lodo pode considerar, como referência, os limites fixados pela proposta de Norma Técnica da Sanepar, mostrados na Tabela 3.3.

3.2 . Microrganismos patogênicos

Os organismos patogênicos, normalmente presentes no esgoto sanitário, podem ser divididos em quatro grupos: fungos, vírus, bactérias e parasitos (*stricto sensu*). Normalmente, nos sistemas de tratamento de esgoto, os microrganismos ficam adsorvidos às partículas sólidas e tendem a se precipitar durante a fase de decantação, concentrando-se no lodo de esgoto. No entanto, a densidade de patógenos presentes no lodo é variável, pois está ligada às características da comunidade e ao tipo de tratamento a que o lodo foi submetido.

Nos países mais desenvolvidos, que tratam a maior parte do esgoto gerado e cuja população apresenta padrões adequados de saúde, a densidade de alguns agentes patogênicos no lodo é baixa, principalmente com relação a ovos de helmintos, ao contrário dos países em desenvolvimento. Nestes, a incidência de parasitoses pode ser elevada e se, associada à ineficiência do tratamento do esgoto, pode limitar o emprego do lodo para os mais variados fins.

A tabela 3.4 correlaciona os principais agentes patogênicos no esgoto e no lodo com as doenças e sintomas causados.

Tabela 3.4- Principais agentes patogênicos no lodo correlacionados com as doenças causadas.

ORGANISMO	DOENÇAS /SINTOMAS
BACTÉRIA	
<i>Salmonella sp.</i>	Salmonelose. Febre tifóide
<i>Shigella sp.</i>	Desintéria bacilar
<i>Yersinia sp.</i>	Gastroenterite aguda (inclusive diarreias e dores abdominais).
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenterite
<i>Escherichia coli (cepas patogênicas)</i>	Gastroenterite
VÍRUS ENTÉRICOS	
<i>Vírus da hepatite A</i>	Hepatite infecciosa
<i>Virus e semelhantes</i>	Gastroenterite epidêmica e diarreia grave
<i>Rota virus</i>	Gastroenterite aguda e diarreia grave
ENTEROVÍRUS	
<i>Poliovírus</i>	Poliomielite
<i>Coxsackievirus</i>	Meningite, pneumonia, hepatite, febre, sintomas parecidos com a gripe
<i>Ecovirus</i>	Meningite, paralisia, encefalite, febre, sintomas de gripe, diarreia
<i>Reovirus</i>	Infecções respiratórias, gastroenterite
<i>Astrovirus</i>	Gastroenterite epidêmica
<i>Calicivirus</i>	Gastroenterite epidêmica
PROTOZOÁRIOS	
<i>Cryptosporidium sp.</i>	Gastroenterite
<i>Entamoeba histolitica</i>	Enterite aguda
<i>Giardia lamblia</i>	Giardíase (inclusive diarreia, caimbras abdominais e perda de peso)

<i>Balantidium coli</i>	Diarréia e desinteria
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmose
HELMINTOS	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Distúrbios digestivos e nutricionais, dores abdominais, vômitos, cansaço
<i>Ascaris suum</i>	Pode produzir sintomas como dor no peito, tosse e febre
<i>Trichuris trichiura</i>	Dores abdominais, diarréia e anemia, perda de peso
<i>Toxocara canis</i>	Febre, desconforto abdominal, dores musculares, sintomas neurológicos
<i>Taenia saginata</i>	Nervosismo, insônia, anorexia, dores abdominais, distúrbios digestivos
<i>Taenia solium</i>	Nervosismo, insônia, anorexia, dores abdominais, distúrbios digestivos
<i>Necator americanus</i>	Doença de Hookworm
<i>Hymenolepis nana</i>	Teníase

Fonte: EPA 1992

A Tabela 3.5 apresenta os níveis médios de patógenos e de indicadores encontrados no lodo da ETE Belém- Curitiba , Bom Retiro – Londrina e ETE Sul – Londrina

Tabela 3.5 - Níveis médios de patógenos e de indicadores no lodo de algumas ETES

Lodo da ETE	Coli total (NMP/100 g)	Coli fecal (NMP/100 g)	Estreptococos fecais (NMP/100g)	Nº de Ovos de helmintos/gMS	Viabilidade de ovos de helmintos %
ETE SUL – Londrina RALF	-----	-----	-----	0,87	51
Vila Tebas – RALF -Curitiba	-----	-----	-----	6,83	39
Padilha – RALF – Curitiba	-----	-----	-----	3,12	39
ETE Belém – Sistema Carrousel - Curitiba	7,54.10 ⁸	86,4.10 ⁶	36,7.10 ⁶	4,85	43

Fonte: adaptação de Soccol et al, 1997; Fernandes et al,1996.

O conhecimento dos agentes patogênicos e da sua viabilidade permite avaliar o potencial de risco de infecção a que o homem e outros animais estão expostos. Dentre os agentes patogênicos presentes a maior preocupação é com os parasitas intestinais (ovos de helmintos e cistos de protozoários), devido à alta frequência de helmintos na população, longo tempo de sobrevivência dos ovos de helmintos no meio externo e sua baixa dose infectante (um ovo ou cisto é suficiente para infectar o hospedeiro).

Os sistemas de tratamento de esgotos convencionais não são capazes de eliminar 100% os microrganismos e principalmente os ovos de helmintos. Foram encontrados ovos de helmintos e cistos de protozoários em lodo tratado pelo processo aeróbio (ETE Belém – Curitiba), identificando-se a presença de nematóides *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*, *Toxocara sp.*, dos cestóides *Taenia sp.*, *Hymenolepis nana*, *H. diminuta*. (Soccol et al, 1997)

Observou-se também que *Ascaris lumbricoides* era o parasita prevalente (86,4%), para o caso específico. A EPA recomenda a presença de menos de 01 ovo por 04 gramas de lodo seco para classificá-lo como lodo tipo A, o que não representa risco à saúde humana ou animal. Os ovos de helmintos encontrados no lodo da ETE Belém – Curitiba apresentaram um valor médio de viabilidade de 43%, resultando em 1,85 ovos de helmintos por grama de matéria seca. O processo de digestão anaeróbia (RALF) teve eficácia na redução da viabilidade de ovos de helmintos variando de 60 a 85%, dependendo das condições operacionais dos RALFs (Soccol et al, 1997).

Portanto, o tratamento posterior do lodo é considerado necessário para a completa destruição dos ovos de helmintos, para que possa ser utilizado na agricultura.

Alguns dos processos de tratamento do lodo que podem ser empregados para o controle de patógenos e para redução de atração de vetores são: compostagem, tratamento pelo calor, pasteurização, digestão aeróbia, digestão anaeróbia, radiação gama, radiação beta, hipercloração e estabilização pela cal (EPA, 1992 citado por Soccol, 1996) A eficiência destes métodos depende da natureza do patógeno existente no lodo, bem como da qualidade operacional dos mesmos.

Das alternativas de tratamento de lodo, visando a destruição de microrganismos patogênicos, a compostagem tem se mostrado como uma das mais eficientes. A intensa atividade microbiológica durante o processo permite o desenvolvimento de uma população de microrganismos termófilos já no início do processo, o que faz com que a temperatura do meio se mantenha elevada por vários dias, destruindo grande parte dos patógenos, garantindo que o composto obtido não coloque em ameaça a saúde pública ou o meio ambiente.

A eficiência da inativação térmica dos patógenos depende de ambos, temperatura e tempo de exposição, a uma dada temperatura.

A Tabela 3.6 apresenta alguns dados referentes a temperaturas e tempos necessários para a destruição de patógenos em biossólidos

Tabela 3.6 Tempos e temperaturas necessárias para destruição de patógenos em biossólidos

Organismo	Tempo de exposição (em minutos) para a destruição de patógenos a várias temperaturas				
	50°C	55°C	60°C	65°C	70°C
Entamoeba histolífica	5				
Ovos de Ascaris lumbricoides	60	7			
<i>Brucella abortus</i>		60		3	
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>		45			4
<i>Salmonella typhi</i>			30		4
<i>Escherichia coli</i>			60		5
<i>Micrococcus pyogenes var. aureus</i>					20
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>					20
<i>Shigella sp.</i>	60				
<i>Mycobacterium diphtheria</i>	45				
<i>Necator americanus</i>	50				
<i>Taenia saginata</i>					5
Virus					25

Fonte: Stern, (1974), citado por Epstein, 1997

Se a operação de compostagem não for conduzida adequadamente há fortes probabilidades de os organismos patogênicos sobreviverem ao processo. A ausência de microrganismos patogênicos no composto final é extremamente importante, uma vez que este vai ser utilizado em aplicações nas quais as pessoas estarão diretamente expostas.

Embora as perspectivas sobre a segurança biológica do uso do lodo no solo sejam positivas, a análise aprofundada dos níveis de contaminação do lodo, dos processos de desinfecção do mesmo e dos componentes no solo, especialmente, em relação aos ovos de helmintos, não pode ser negligenciada, pois são eles que apresentam maior tempo de sobrevivência no solo e são os mais resistentes aos processos de desinfecção.

3.3 - Compostos orgânicos tóxicos

Compostos orgânicos tóxicos podem estar presentes no lodo devido às seguintes fontes de contaminação:

- Doméstica: restos de solventes, pinturas, detergentes;
- Efluentes industriais: indústrias químicas em geral;
- Águas pluviais: infiltram-se na rede coletora de esgoto carreando resíduos de produtos utilizados em veículos automotores, pesticidas, etc.

Os biossólidos podem conter compostos orgânicos como um resultado da disposição de águas residuárias industriais, comerciais, esgotos domésticos além de substâncias químicas provenientes da deposição atmosférica. Pesticidas podem ser encontrados em resíduos de jardinagem e alimentícios. Fitalatos são encontrados em plásticos junto com tintas orgânicas e outros compostos. Papel pode conter compostos orgânicos tóxicos provenientes da tinta de impressão e as cinzas descartadas de incineradores podem conter dioxinas.

O impacto dos compostos orgânicos sobre a saúde e meio ambiente é função do nível de contaminação, da taxa em que são acumulados nos grãos e plantas e da biodisponibilidade.

A tabela 3.7 apresenta alguns dos efeitos sobre a saúde dos principais compostos orgânicos tóxicos presentes em biossólidos.

Tabela 3.7 - Principais efeitos sobre a saúde provenientes de compostos orgânicos tóxicos quando presentes em biossólidos.

Compostos orgânicos tóxicos	Efeitos sobre a saúde
Aldrin e dieldrin	Afetam o sistema nervoso central. Em doses altas é fatal para o homem.
Benzeno	A exposição aguda ocasiona a depressão no sistema nervoso central. Estudos sugerem que existe relação entre exposição de benzeno e leucemia.
Clordano	Provoca vômitos e convulsões. Pode causar mutações
Lindano	Causa irritação do sistema nervoso central, náusea, vômitos, dores musculares e respiração debilitada.
clorofórmio	Severamente tóxico em altas concentrações; danos ao fígado e ao coração; cancerígeno a roedores

PCB	Provavelmente cancerígeno; exposição ao mesmo resulta em dores de cabeça e distúrbios visuais
DDT	Causa problemas, principalmente no sistema nervoso central, causa decréscimo das células brancas do sangue e acumula-se nos tecidos gordurosos.

Fonte: Barros et al 1995

Hoje sabe-se que muitas bactérias, fungos e outros organismos, sob condições aeróbias podem degradar compostos orgânicos.

Logo, a compostagem pode ser uma forma efetiva de reduzir o nível de resíduos orgânicos e inorgânicos que normalmente seriam dispostos de outras formas e que conseqüentemente permaneceriam no meio ambiente.

São limitados os dados sobre os compostos orgânicos tóxicos no composto. A razão disso é que, historicamente, a preocupação tem sido maior com a regulamentação de metais pesados, enquanto os orgânicos tóxicos, exceto os PCBs (bifenil policlorado), não são regulamentados. O custo para suas análises é alto, o que também desencoraja sua identificação. Como consequência , os dados frequentemente são conflitantes. O problema pode estar nos procedimentos analíticos, nos níveis de detecção ou na eficiência da compostagem.

A presença de tóxicos orgânicos no composto depende do tipo de resíduo envolvido.

Observou-se que muitos compostos orgânicos detectados nos resíduos a serem compostados não foram detectados posteriormente no composto. Alega-se que isto poderia ser devido a biodegradação, volatilização ou fotólise.

Tendo em vista que os níveis de substâncias orgânicas tóxicas detectados, nos Estados Unidos, foram extremamente baixos, estas foram excluídas da Norma 40CFR503, referente a regulamentação de biossólidos. Alguns dos dados relatados pela EPA são mostrados na Tabela 3.8 .

Tabela 3.8 - Algumas substâncias orgânicas tóxicas em biossólidos

Substância orgânica	Porcentagem detectada	Média (μ / kg)	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Benzeno	2	9,74	2,08	0,21
Dieldrin	3	2,70	238,6	88,22
Heptacloro	2	2,81	4,67	1,66
Lindano	2	3,88	454,00	116,98
PCB 1260	9	112,43	1629,78	14,50
Tricloroetano	5	59,42	6947,1	116,92
4,4-DDT	3	22,82	13,78	0,60

Fonte: USEPA, 1990 citado por Epstein, 1997

Alguns estudos (Epstein, 1997), mostraram que compostos de biossólidos tinham níveis de PCB na faixa de não detectado a 0,20 ppm; em compostagem de biossólidos com resíduos de jardins, o nível de PCB variou de não detectado a 0,41 ppm, e em compostagem de biossólidos com resíduos sólidos urbanos os valores variaram de 0,15 a 0,38 ppm. Estes estudos permitiram concluir que a compostagem degradou significativamente muitos dos compostos orgânicos tóxicos.

Capítulo 4 - SISTEMAS DE COMPOSTAGEM

Sendo um processo biológico de tratamento de resíduos, a compostagem obedece a princípios básicos que foram definidos no capítulo 1. Porém, as tecnologias de implantação do processo admitem alternativas que podem variar de sistemas simples e manuais, até sistemas complexos, altamente tecnificados, onde todos os parâmetros do processo são monitorados e controlados com precisão.

O interessante da compostagem é que um bom composto pode ser obtido tanto por tecnologias simples como por tecnologias complexas, desde que os resíduos sejam adequados e o processo biológico ocorra em boas condições. A questão realmente importante a ser colocada é que a alternativa escolhida deve ser adequada à situação, do ponto de vista técnico e sócio-econômico.

Os processos de compostagem podem ser divididos em três grandes grupos:

- Sistema de leiras revolvidas (*windrow*), onde a mistura de resíduos é disposta em leiras, sendo a aeração fornecida pelo revolvimento dos resíduos e pela convecção e difusão do ar na massa do composto. Uma variante deste sistema, além do revolvimento, utiliza a insuflação de ar sob pressão nas leiras
- Sistema de leiras estáticas aeradas (*static pile*), onde a mistura a ser compostada é colocada sobre uma tubulação perfurada que injeta ou aspira o ar na massa do composto, não havendo revolvimento mecânico das leiras.
- Sistemas fechados ou reatores biológicos (*In-vessel*), onde os resíduos são colocados dentro de sistemas fechados, que permitem o controle de todos os parâmetros do processo de compostagem.

Os dois primeiros sistemas geralmente são realizados ao ar livre, sendo em alguns casos realizados em áreas cobertas. A compostagem em reatores biológicos apresenta várias alternativas de reatores e níveis de automação. No sentido de facilitar a compreensão do tema, para cada sistema foi colocada sua designação entre parênteses, em inglês, pois muitas pesquisas e tecnologias foram geradas nos Estados Unidos, o que faz com que vários veículos de comunicação utilizem a nomenclatura em inglês.

4.1 - Sistema de leiras revolvidas (*windrow*)

Dos três sistemas de compostagem apresentados, o de leiras revolvidas é o mais simples. A mistura de lodo e resíduo estruturante é disposta em longas leiras que são periodicamente revolvidas.

A aeração é feita pela difusão e convecção do ar na massa do composto. No momento em que é feito o revolvimento, o composto entra em contato com a atmosfera rica em O_2 , o que permite suprir momentaneamente as necessidades de aeração do processo

biológico. O efeito do revolvimento é limitado, pois alguns estudos mostraram que cerca de uma hora depois, o nível de oxigênio da leira se aproxima de zero.

Nos Estados Unidos, em alguns casos, a leira é montada sobre tubos perfurados que injetam ar na massa do composto. Esta alternativa é chamada de leiras revolvidas aeradas, pois combinam a técnica do revolvimento com a aeração forçada.

A compostagem do lodo pelo sistema de leiras revolvidas segue o fluxo mostrado na Figura 4.1.

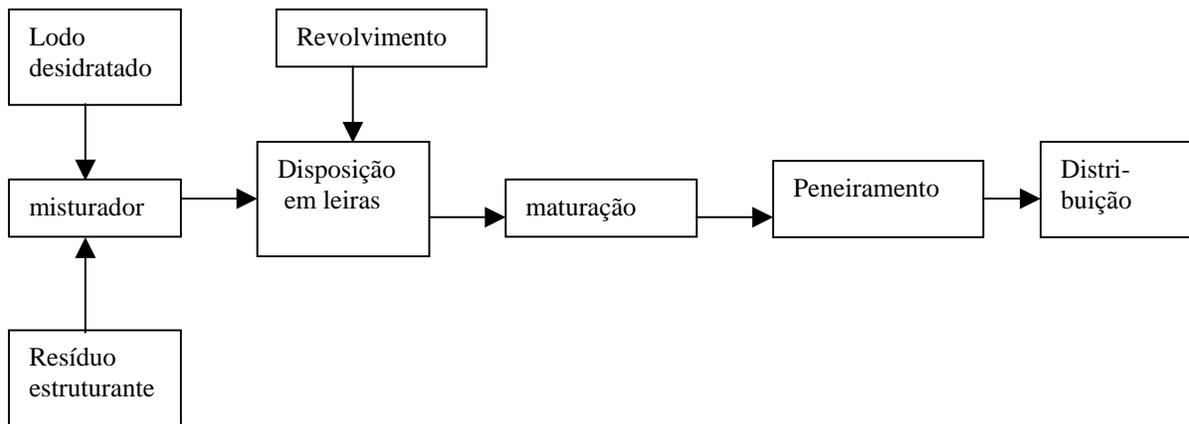


Figura 4.1 - Esquema genérico aplicável à compostagem do lodo pelo sistema de leiras revolvidas.

A mistura do lodo com o agente estruturante pode ser feita por um misturador específico ou então na própria área de compostagem, quando existe a possibilidade de utilização de um equipamento mecânico eficiente.

Existem máquinas específicas para misturar e revolver o composto, sendo estas máquinas de dois tipos básicos:

- Implementos traçados por tratores agrícolas, sendo alguns já fabricados no Brasil (Figura 4.2)
- Equipamentos auto-propelidos, como mostrado na Figura 4.3, que se deslocam sobre a leira de composto e realizam o revolvimento, deixando as leiras com dimensões padrão, fixadas pelo modelo do equipamento.
- Pás carregadeiras convencionais, cuja eficiência é menor, porém podem ser usadas com bons resultados.

Figura 4.2 - Equipamento fabricado no Brasil, traçado por trator agrícola, utilizado para revolver leiras.

A altura e seção das leiras dependem do resíduo estruturante e do método de construção da leira, sendo que as de seção triangular, com 1,50m a 1,80m de altura e 4,0m a 4,5m

de base, são as mais comuns e que apresentam resultados comprovados. Porém é possível variar as dimensões , como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1.- Comparação entre as dimensões das leiras e áreas necessárias para a compostagem, pelo sistema de leiras revolvidas.

Parâmetro	Baixo	Médio	Alto
Altura (m)	0,9	1,4	2,1
Base (m)	3,7	4,3	7,0
Volume por comprimento (m ³ /m)	2,3	3,1	8,8
Relação Superfície/Volume (m ² /m ³)	2,6	1,6	0,8

Fonte: Hay et al., 1985

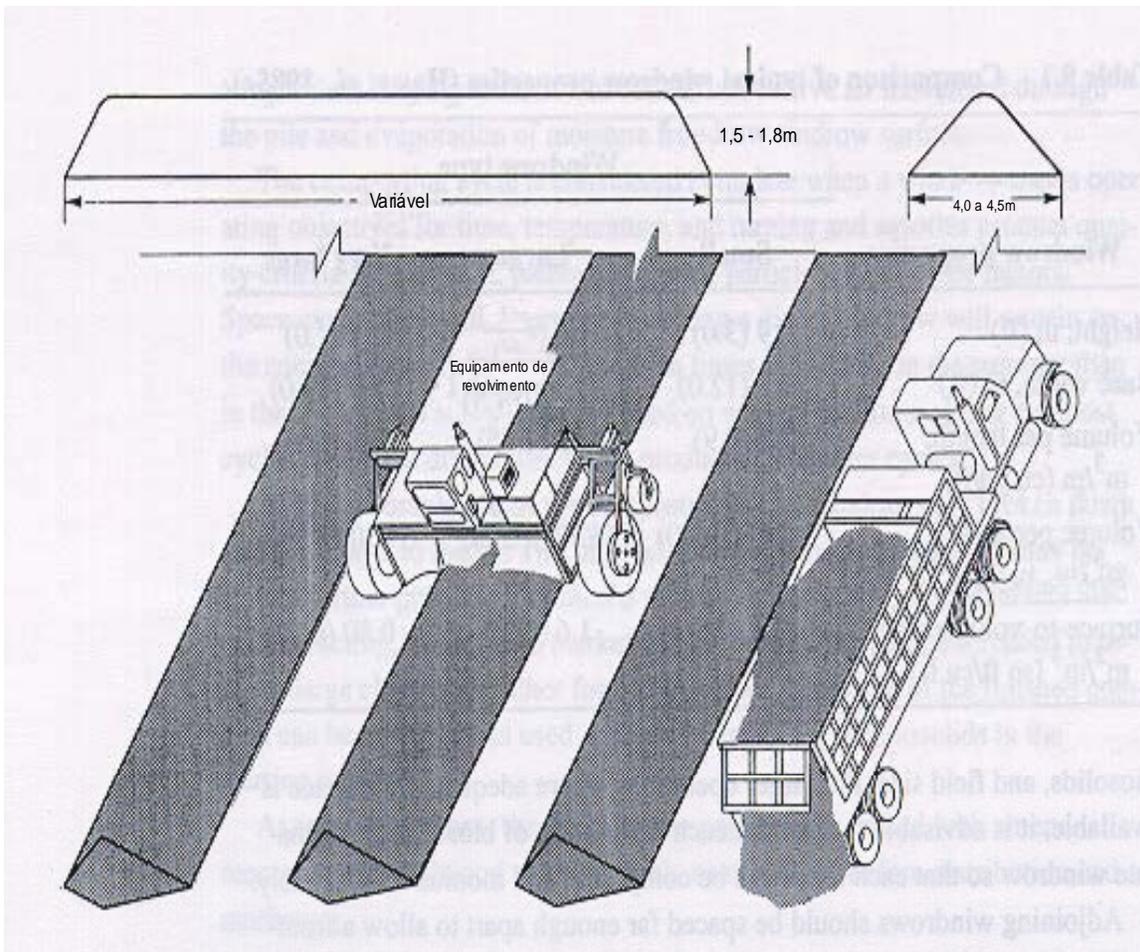


Figura 4.3 – Exemplo de sistema de leiras revolvidas

O espaçamento entre as leiras deve ser determinado em função das características do equipamento que fará o revolvimento. Caso seja uma Pá Carregadeira , um espaçamento de 3,0m geralmente é suficiente.

Durante a compostagem , as leiras devem ser revolvidas no mínimo três vezes por semana (Kuter, 1995), sendo que esta operação tem vários objetivos:

- Aerar a massa de resíduos em compostagem
- Aumentar a porosidade do meio, que sofre uma compactação natural devido ao peso próprio
- Homogeneizar a mistura
- Expor as camadas externas às temperaturas mais elevadas do interior da leira, melhorando a eficiência da desinfecção
- Em alguns casos, reduzir a granulometria dos resíduos
- Diminuir o teor de umidade do composto

Se a mistura de lodo e resíduo estruturante está bem equilibrada, nos primeiros 2-4 dias de compostagem, a temperatura deve passar dos 55 °C e se estabilizar em torno de 60 °C, durante toda a fase de bioestabilização, que terá duração variável, em função das características dos resíduos e da operação do sistema. A título de referência, um período de 1 a 2 meses, normalmente é suficiente para que a fase termófila complete seu ciclo.

Na etapa seguinte, a maturação, o composto normalmente é transportado para um pátio específico, onde a necessidade de aeração é menor , podendo o revolvimento ser realizado a cada 20-25 dias.

O final da fase de maturação pode ser comprovado por testes específicos, porém tem duração média, de 2 a 3 meses. Após a maturação, o composto pode ser peneirado e ensacado, ou então vendido a granel. O material mais grosseiro retido nas peneiras pode retornar ao início do processo e desempenhar a função de agente estruturante.

O sistema de leiras revolvidas pode gerar alguns problemas de odor no início do processo, quando o lodo, mesmo estabilizado na ETE, ainda apresenta mau cheiro. Porém , quando o processo de compostagem evolui satisfatoriamente , após 5-6 dias , o problema de odor praticamente desaparece (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Vista geral do experimento de compostagem de lodo e resíduos de podas de árvores, pelo sistema de leiras revolvidas, realizado pela Universidade Estadual de Londrina (1998).

A emissão de odores é mais intensa no momento do revolvimento. Portanto, caso o sistema de compostagem apresente este problema, devem ser tomadas as seguintes providências:

- Solicitar à ETE que produza lodo com maior grau de estabilização

- Montar as leiras diariamente, evitando o processamento de grandes volumes de lodo em um único dia
- Realizar o revolvimento em dias sem ventos sobre a área de compostagem.

4.2 - Sistema de leiras estáticas aeradas

Neste sistema a mistura de lodo e resíduo estruturante é colocada sobre uma tubulação perfurada, conectada a um soprador industrial. A aeração necessária será fornecida por este sistema de injeção de ar sob pressão ou por sucção.

A Figura 4.5 mostra esquematicamente o fluxo do processo.

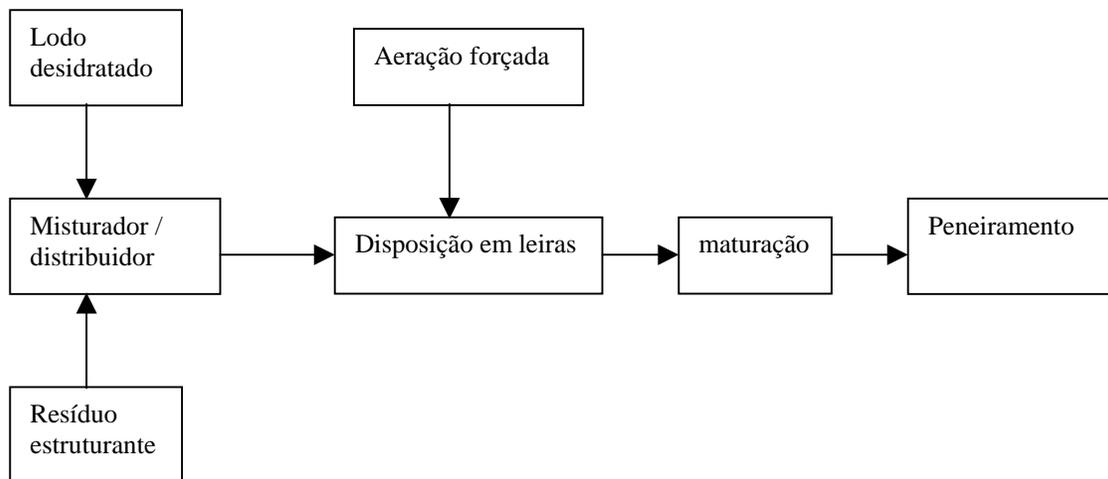


Figura 4.5 - Esquema simplificado do sistema de compostagem em leiras estáticas aeradas

Neste sistema, uma vez que a mistura de resíduos é colocada sobre as tubulações de aeração, ela permanece estática até o final da fase de bioestabilização (Figura 4.6).

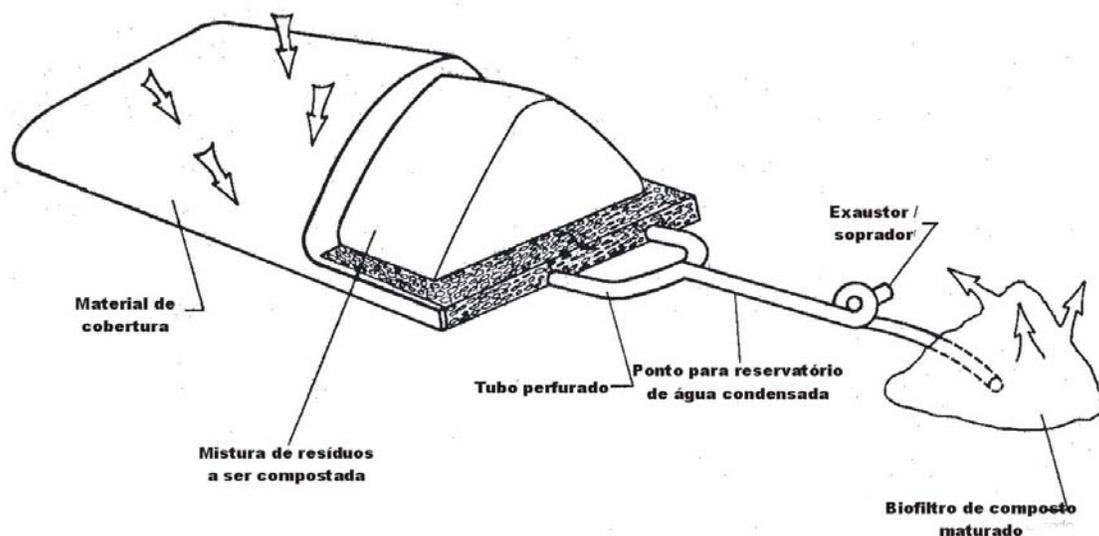


Figura 4.6 – Exemplo de sistema de compostagem com leiras estáticas aeradas

Nos Estados Unidos, onde este sistema é bastante utilizado, os sopradores mais empregados têm potência entre 1 e 5 HP, de acordo com as características e volume dos resíduos, sendo ligados e desligados de maneira intermitente, durante a fase de bioestabilização. Estes sopradores trabalham a pressões internas de 600 a 1.000 mm de coluna d'água.

A aeração deve ser dimensionada de acordo com os objetivos visados:

- a) Satisfazer às demandas de oxigênio do processo de biodegradação aeróbia
- b) Remover o excesso de umidade
- c) Remover o excesso de calor para manter a temperatura em torno de 60 °C

De acordo com os objetivos fixados, as necessidades de aeração podem variar bastante.

De acordo com a EPA (1985), Connery et al., compostando lodo de esgoto fresco, mostraram que para uma taxa de aeração elevada, próxima de 3,6 m³/min/t de matéria seca de composto, 20 minutos após a parada do soprador, a atmosfera interna da massa de resíduos apresentou condições anaeróbias. Os ciclos de funcionamento dos sopradores devem, portanto, levar em conta esta dinâmica do consumo de oxigênio.

A demanda de oxigênio também é variável de acordo com a fase do processo de compostagem, sendo pequena nos primeiros dias e crescendo muito após a instalação da fase termófila. Em seguida, quando a temperatura diminui novamente a patamares mesófilos, o consumo de oxigênio cai novamente.

Em função desta grande variação de demanda, é possível dimensionar um sistema de aeração dotado de um dispositivo capaz de medir o consumo de oxigênio pelos microrganismos, enviar estes dados a um computador, que dotado de um programa específico, permite regular a intensidade e frequência de acionamento dos sopradores.

O limite de 2 – 5 % nos gases de aspiração é válido para suprir estritamente as demandas de oxigênio da população microbiana, mas caso o dimensionamento da aeração seja definido pela necessidade de manter a temperatura entre 55 e 65 °C, então o parâmetro a ser monitorado será a temperatura e não o teor de oxigênio, que aliás, neste caso, será elevado, pois as necessidades de aeração para manter a temperatura nestes níveis é muito superior à estrita demanda de oxigenação do processo de biodegradação.

A Universidade Estadual de Londrina pesquisa um sistema de retroalimentação controlado por computador, para a regulação das taxas de aeração. Neste caso a frequência do ciclo de funcionamento dos aeradores é regulada pelos parâmetros escolhidos para controlar o processo.

Quanto ao sentido da aeração, injeção ou aspiração do ar, vários autores defendem o ponto de vista de que a aspiração diminui os caminhos preferenciais de passagem do ar na massa do composto, diminuindo portanto as microzonas de anaerobiose. A sucção do ar também tem a vantagem de permitir melhor controle de odores, pois o ar que percorre a massa do composto é captado pelas tubulações e pode passar posteriormente por um sistema de tratamento de odores.

Um sistema muito simples e eficiente para o tratamento de odores consiste em fazer o ar aspirado passar por uma leira de composto já maturado (Figura 4.6). O composto maturado tem a capacidade de reter moléculas orgânicas voláteis causadoras do mau odor.

O sistema de aeração também pode alternar injeção e aspiração de ar.

A tubulação de aeração pode ser constituída por tubos de PVC branco de 100 mm de diâmetro, sendo os orifícios de saída de ar espaçados de no máximo 18 cm (EPA, 1978).

É recomendável recobrir a tubulação com uma camada de 20-30 cm de resíduo estruturante seco, para evitar entupimentos. Cavacos de madeira, pela sua porosidade e resistência mecânica, são excelentes para esta finalidade.

Depois de formadas as leiras , também é importante recobri-las com uma camada de aproximadamente 5 cm de resíduo estruturante ou de composto já curado. Esta prática visa:

- a) Proteger o composto do ressecamento superficial , o que impediria a atividade microbiológica nesta região
- b) Isolar a massa de resíduos de moscas , que são atraídas nos primeiros dias do processo
- c) Isolar parcialmente os resíduos do meio externo, permitindo a elevação da temperatura na camada externa, o que contribui para melhorar a eficiência de remoção de patógenos.

No sistema de leiras aeradas, os sopradores devem funcionar durante toda a fase termófila (bioestabilização), que é a fase de maior demanda de oxigênio. Para o lodo de esgoto e resíduos estruturantes usuais, o período de aeração varia de 14 a 28 dias, sendo 21 dias a média mais comum.

Após a fase termófila o composto pode ser transportado para outro local, onde será realizada a maturação , que deve durar em torno de 60 dias. Nesta fase as necessidades de oxigenação são baixas e o composto pode ficar em leiras sem aeração , sendo revolvido a cada 20-25 dias.

Este sistema de compostagem também permite a formação de leiras em duas configurações:

- a) Leiras isoladas, como as descritas para o sistema de leiras revolvidas
- b) Leiras agrupadas, onde a massa de resíduos é colocada em blocos compactos de grandes dimensões (Figura 4.7).

No primeiro caso é mais fácil gerir a evolução de lotes separados de composto, formando-se , por exemplo , uma leira por dia.

No caso das leiras agrupadas, como o volume de resíduos fica armazenado em bloco, as produções de cada dia ficam dispostas umas sobre as outras, dificultando a gestão e o controle dos diferentes lotes. Este tipo de leira tem por outro lado , a vantagem de otimizar o uso do terreno, reduzindo as áreas necessárias.

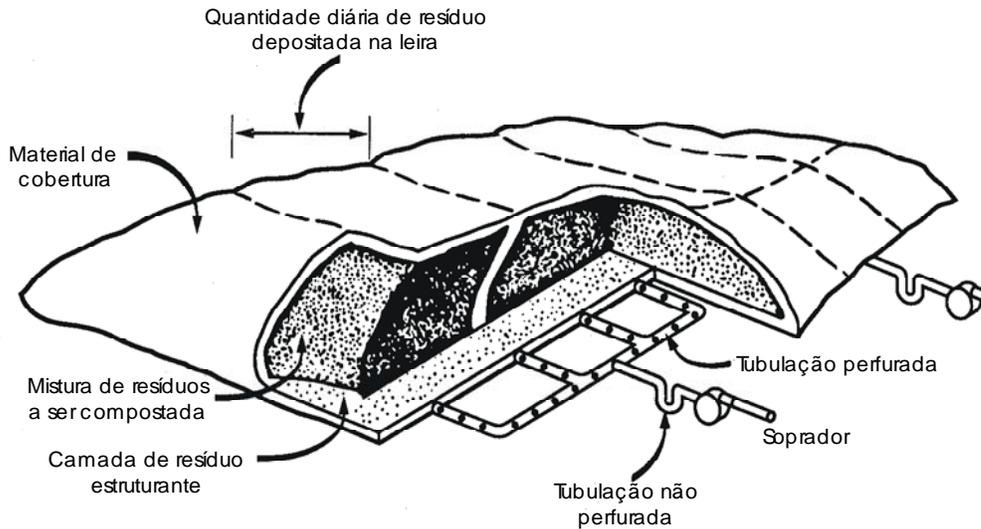


Figura 4.7 – Compostagem em leiras aeradas agrupadas

4.3 - Sistemas de reatores biológicos

A compostagem realizada em reatores biológicos (*In-Vessel*), oferece a possibilidade de maior controle sobre todos os parâmetros importantes para o processo de compostagem, portanto, o ciclo da fase termófila é reduzido, o que em certos casos conferiu, à compostagem em reator, a denominação de “compostagem acelerada”.

Devido à homogeneidade do meio, inclusive com relação à temperatura, a compostagem em reatores também é tida como mais eficiente no controle dos patógenos. Outra característica desta alternativa é a maior facilidade para controlar odores, pois o sistema é fechado e a aeração controlada.

De acordo com as características dos resíduos e do tipo de equipamento, o tempo de detenção no reator biológico pode variar de 7 a 20 dias, o que faz com que o sistema demande menor espaço para sua implantação.

A aeração é feita sob pressão e como o sistema é fechado, também se torna mais fácil monitorar a taxa de aeração e adequá-la às necessidades do processo. No caso, pode ser medido o teor de oxigênio dos gases de saída do reator e quando a porcentagem de O_2 estiver próxima de 2%, aumenta-se a vazão de ar para impedir condições de anaerobiose. A Universidade Estadual de Londrina desenvolveu um reator piloto para a definição de parâmetros de projetos de usinas de compostagem, que é dotado de um mecanismo de retroalimentação, que em função do teor de oxigênio dos gases de saída, realiza automaticamente a variação de vazão do ar, de acordo com as necessidades da compostagem.

Mesmo tendo uma fase termófila mais rápida e intensa, após seu final, o composto ainda deve passar por um período de maturação de mais ou menos 60 dias, tal como descrito para os sistemas anteriores, antes de ser utilizado.

A compostagem em reator é mais dependente de equipamentos mecânicos do que os sistemas de leiras revolvidas ou leiras estáticas aeradas, sendo que, sua sofisticação tecnológica é variável de acordo com o fabricante dos reatores e da escala da usina de compostagem.

De modo geral os vários tipos de reator se enquadram em três grandes categorias :

- a) Reatores de fluxo vertical
- b) Reatores de fluxo horizontal
- c) Reatores de batelada

Nos dois primeiros casos , os resíduos passam pelos reatores em fluxo contínuo, sendo que o período de detenção é definido pela velocidade com que os resíduos percorrem o trajeto da entrada até a saída do reator. No terceiro caso, o reator, recebe uma determinada quantidade de resíduos, processa-os , e quando a fase termófila chega ao seu final, o reator é aberto, descarregado em batelada, recomeçando-se o processo com novos resíduos frescos.

4.3.1- Reatores de fluxo vertical

São constituídos por sistemas parecidos com silos verticais onde os resíduos geralmente entram pela parte superior e percorrem o reator no sentido descendente. O ar pode ser injetado em vários níveis ou apenas na parte inferior do reator.

O dimensionamento é feito de tal forma que quando o composto chega á parte inferior do reator, a fase termófila terminou. O composto então é descarregado e transportado ao pátio de maturação.

4.3.2 -Reatores de fluxo horizontal

Apresentam geralmente forma cilíndrica e são dispostos horizontalmente. Por estas características às vezes são conhecidos como túneis.

Os resíduos entram por uma extremidade do reator e saem pela outra , com tempo de detenção suficiente para a realização da fase termófila. O ar é injetado sob pressão ao longo do trajeto .

4.3.3 - Reatores de batelada

Difere dos anteriores pelo fato do composto ficar confinado no mesmo local , sem se deslocar. O reator geralmente é dotado de um sistema de agitação da massa de resíduos, que pode ser por rotação lenta do reator em torno de seu próprio eixo, ou por um sistema misturador interno. O revolvimento é necessário para limitar os caminhos preferenciais de passagem do ar , porem alguns modelos de reatores, por batelada, não são dotados deste dispositivo.

4.4 - Vantagens e desvantagens dos sistemas

Um bom composto não requer, necessariamente, de tecnologia sofisticada para ser produzido. É necessário um bom controle sobre a qualidade dos resíduos que serão utilizados, a definição criteriosa das proporções de combinação dos resíduos e bom monitoramento do processo biológico de compostagem, de acordo com os parâmetros comentados no Capítulo 1.

Com relação á tecnologia a ser utilizada, a escolha deve ser feita considerando-se critérios técnicos e econômicos.As principais vantagens e desvantagens dos três sistemas são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Principais vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas de compostagem.

Sistema de compostagem	Vantagens	Desvantagens
Leiras revolvidas	1-Baixo investimento inicial 2-Flexibilidade de processar volumes variáveis de resíduos 3-Simplicidade de operação 4-Uso de equipamentos simples 5-Produção de composto homogêneo e de boa qualidade 6- Possibilidade de rápida diminuição do teor de umidade das misturas devido ao revolvimento	1- Maior necessidade de área , pois as leiras tem que ter pequenas dimensões e há necessidade de espaço livre elas 2- Problema de odor mais difícil de ser controlado, principalmente no momento do revolvimento 3- Muito dependente do clima. Em períodos de chuva o revolvimento não pode ser feito 4- O monitoramento da aeração deve ser mais cuidadoso para garantir a elevação da temperatura
Leiras estáticas aeradas	1- Baixo investimento inicial 2- Melhor controle de odores 3- Fase de bioestabilização mais rápida que o sistema anterior. 4- Possibilidade de controle da temperatura e da aeração	1-Necessidade de bom dimensionamento do sistema de aeração e controle dos aeradores durante a compostagem 2-Operação também influenciada pelo clima

	5- Melhor uso da área disponível que no sistema anterior	
Compostagem em reator	<ul style="list-style-type: none"> • Menor demanda de área • Melhor controle do processo de compostagem • Independência de agentes climáticos • Facilidade para controlar odores • Potencial para recuperação de energia térmica (dependendo do tipo de sistema) 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior investimento inicial • Dependência de sistemas mecânicos especializados, o que torna mais delicada e cara a manutenção • Menor flexibilidade operacional para tratar volumes variáveis de resíduos • Risco de erro difícil de ser reparado se o sistema for mal dimensionado ou a tecnologia proposta for inadequada.

Capítulo 5. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES DE PROJETO PARA USINAS DE COMPOSTAGEM

A tomada de decisão sobre o tipo de tratamento de lodo a ser utilizado em uma comunidade é um processo que deve levar em conta:

- Os planos de expansão de redes coletoras de esgoto e o aumento das vazões a serem tratadas;
- As características das ETEs já implantadas e as ETEs futuras;
- Dados qualitativos do lodo produzido;
- Estudo preliminar de várias alternativas de tratamento do lodo e seu destino final.

Caso a alternativa escolhida seja a compostagem, deve ser feito um estudo mais aprofundado da tecnologia a ser implantada, da escolha da área para implantação da estação e desenvolvimento de projetos executivos com procedimentos de operação.

O ideal é que o projeto sobre o destino final do lodo faça parte do projeto da ETE, pois só assim é possível o desenvolvimento harmônico do sistema de tratamento de esgotos e do sistema de processamento e destino final do lodo.

Atualmente, já existe um conceito se firmando na área de saneamento de que um projeto de uma Estação de Tratamento não é considerado completo se não contiver o correspondente projeto para o tratamento e destino final do lodo gerado. Infelizmente, existe um histórico de várias ETEs implantadas através de projetos que ao mencionarem a produção do lodo, simplesmente indicavam com uma seta: lodo → destino final adequado.

Logo, muitos sistemas de tratamento e destino final do lodo serão implantados em ETEs que foram projetadas e construídas sem qualquer preocupação sobre que destino dar ao lodo gerado.

5.1. Características das ETEs e tipo de lodo gerado

As características das ETEs influem na quantidade e qualidade do lodo produzido, nas características do lodo, e seu ritmo de produção.

Como foi visto no Capítulo 1, há várias tecnologias e configurações para estações de tratamento de esgotos e a produção de lodo depende do sistema de tratamento implantado. Uma diferenciação importante a ser feita diz respeito ao tratamento do esgoto pela via aeróbia ou anaeróbia.

No tratamento biológico de efluentes líquidos, o mecanismo mais importante para a remoção do material orgânico é o metabolismo bacteriano. As bactérias utilizam o substrato orgânico como fonte de energia ou como material para síntese celular. Quando a matéria orgânica do esgoto é utilizada como energia, então ela é transformada em produtos estáveis, num processo chamado catabolismo. Quando a matéria orgânica é incorporada à massa celular, o processo é conhecido como anabolismo. O anabolismo é um processo que consome energia, sendo portanto viável apenas quando ocorre simultaneamente o catabolismo, que fornece a energia necessária para a síntese celular.

No caso do metabolismo aeróbio, o catabolismo representa 33% das transformações e o anabolismo 67%. No metabolismo anaeróbio (metanogênico), o catabolismo representa 97% das transformações e o anabolismo apenas 3%. Segundo Van Haandel (1994), nos sistemas anaeróbios, pode-se esperar uma

produção de lodo da ordem de 0,1 g SSV.g⁻¹ DQO, enquanto que nos sistemas aeróbios esta relação é de no mínimo 0,2 g SSV.g⁻¹ DQO.

Os sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos produzem portanto menos lodos que os sistemas aeróbios.

Alguns dados genéricos sobre as produções de lodo de vários sistemas são dados na Tabela 5.1 .

Tabela 5.1- Dados genéricos sobre as produções de lodo de vários sistemas

Tipo de Tratamento	Quantidade de lodo produzido (m ³ /hab.ano)
Lagoa facultativa primária	0,037
Lagoa facultativa	0,03 – 0,08
Lodos ativados convencionais	1,1 – 1,5
Lodos ativados (aeração prolongada)	0,7 – 1,2
Lodos ativados (fluxo intermitente)	0,7 – 1,5
Filtro biológico (baixa carga)	0,4 – 0,6
Filtro biológico (alta carga)	1,1 – 1,5
Reator anaeróbio de manta de lodo	0,07 – 0,1
Fossa séptica – filtro anaeróbio	0,07 – 0,1

Além da produção de lodo, outro dado importante é o grau de estabilização do lodo gerado. Como foi visto no Capítulo 2, a estabilização do lodo reflete o grau de transformação de sua fração orgânica, portanto lodos menos estabilizados apresentam teor de sólidos fixos baixos, sendo sua maior parte formada por matéria orgânica. Um lodo pouco estabilizado tem grande potencial de fermentação, porém apresenta forte odor e potencial de atração de insetos. Lodos primários e lodos ativados frescos (Tabela 2.2) apresentam teor de sólidos na faixa de 12% e são altamente instáveis.

Um lodo estabilizado não apresenta odor muito agressivo, é mais fácil de ser desidratado e apresenta teor de sólidos fixos na faixa de 35 - 40 %.

O grau de estabilização do lodo é um fator importante para sua disposição final e em especial para a compostagem. Normalmente a estabilização ocorre na própria ETE, através de processos biológicos aeróbios ou anaeróbios.

O processo de estabilização mais utilizado é o anaeróbio, no qual o lodo, após separação da fase líquida, é encaminhado a um digestor de lodo onde é submetido a um processo de biodegradação anaeróbia, por período médio de 45 dias.

A estabilização aeróbia ocorre geralmente nos próprios tanques de aeração, quando o sistema realiza uma aeração prolongada.

Nos reatores anaeróbios de fluxo ascendente, o lodo é digerido dentro do próprio reator, sendo que ao ser retirado como lodo em excesso, já apresenta elevado grau de estabilização.

A compostagem em si também é considerada um processo de estabilização do lodo, mesmo levando em conta que o lodo passa por estabilização prévia antes de ser compostado.

Evidentemente, o grau de estabilização do lodo influencia a atividade microbiológica durante o processo de compostagem. Lodos com alto grau de estabilização (50-60% de sólidos fixos) podem não conter os nutrientes energéticos indispensáveis aos microrganismos. A consequência disso é que as misturas de resíduos em processo de compostagem podem apresentar temperaturas baixas, mesmo sendo observados os parâmetros físico-químicos ideais para o processo de compostagem.

No extremo oposto, um lodo muito fresco apresentará grande problema de odor e atração de insetos, o que além de dificultar o trabalho na estação de compostagem pode gerar reclamações das residências mais próximas.

Outro aspecto importante a ser considerado é a frequência de descarga de lodo. Nos sistemas maiores, a descarga geralmente é contínua, porém em sistemas menores, principalmente nos reatores anaeróbios de fluxo ascendente, a descarga é feita por bateladas, sendo realizada em média, a cada 2 meses.

As lagoas de estabilização apresentam frequências de descargas muito espaçadas, de 6 a 15 anos, dependendo do tipo de lagoa.

Outro dado importante é o sistema de desidratação do lodo da ETE. É possível compostar o lodo líquido (3-6% de sólidos totais). Porém, como a umidade ideal para a compostagem é de no máximo 65%, será necessário um grande volume de resíduo estruturante e pouco lodo na composição das misturas.

Esta não é uma boa alternativa, pois o resíduo estruturante representa uma fração importante do custo de operação da usina. Em geral, na maioria das estações de compostagem em funcionamento em vários países, são utilizados lodos com teores de sólidos na faixa de 15-25%.

5.2 . Resíduo Estruturante

Os resíduos estruturantes têm a função de aumentar os espaços vazios da massa em compostagem, absorver o excesso de umidade do lodo, balancear a relação C/N das misturas e fornecer energia aos microrganismos na forma de sólidos voláteis biodegradáveis.

A boa escolha do resíduo estruturante é fundamental para o sucesso de uma usina de compostagem de lodo, pois o resíduo estruturante tem reflexos nos custos e qualidade do produto final. Como apresentado no Capítulo 2, os resíduos de origem vegetal são geralmente os mais usados, embora exista uma grande variedade de resíduos que podem desempenhar esta função, sendo que alguns critérios importantes devem nortear a escolha:

- a) Disponibilidade do resíduo: alguns resíduos são disponíveis em quantidade suficiente apenas em certos períodos do ano. Nesta categoria se enquadram alguns resíduos agro-industriais, que por força do calendário agrícola são processados em épocas bem definidas. Outros resíduos industriais, como a serragem de madeira, têm produção mais uniforme durante o ano.

Os resíduos de poda de árvores, capinas e aparas de grama também sofrem os efeitos das estações do ano, tanto nos volumes produzidos como nas suas características.

- b) Custos: normalmente existe pelo menos o custo de transporte, que acaba sendo um custo considerável, se levado em conta que os resíduos estruturantes têm baixo peso específico. Em certos casos, o resíduo estruturante é em si um problema para seu gerador, portanto, a possibilidade de compostagem pode ser uma alternativa para o processamento do resíduo estruturante pela usina de compostagem, transformando-se assim numa receita adicional.
- c) Necessidade de pré-processamento: alguns resíduos estruturantes necessitam de serem pré-processados, como os resíduos de podas de árvores, que devem ser triturados antes de misturados ao lodo, o que evidentemente influi na concepção da usina de compostagem e no custo final do processo.
- d) Influência nas características do produto final: o tipo de resíduo estruturante pode melhorar ou piorar a qualidade do composto. Resíduos vegetais ricos em nutrientes e livres de contaminações em metais pesados, por exemplo, têm reflexo positivo na qualidade do produto final. Resíduos industriais podem conter contaminantes, assim como o lixo doméstico, que pode conter fragmentos de vidros e plásticos, influenciando negativamente na qualidade final do composto.

É necessário que nos estudos preliminares os possíveis resíduos estruturantes sejam caracterizados, quanto à sua composição química, teor de umidade, peso específico, granulometria e distância do local de produção até a usina de compostagem.

A granulometria final do resíduo estruturante deve estar compreendida entre 0,5 cm e 5,0 cm para que, ao ser misturado ao lodo, confira integridade estrutural à mistura, permitindo boa aeração.

No caso específico dos resíduos de podas de árvore (Figura 5.1) há duas possibilidades de pré-processamento: os moinhos de martelo e os trituradores. Também é possível peneirar o material final do processo para obter granulometria uniforme.

Figura 5.1 – Vista geral de resíduos de podas de árvores ainda não triturados.

A operação de triturar galhos exige equipamentos robustos capazes de triturar caules de 10-15 cm de diâmetro.

Os resíduos agro industriais (bagaço de cana-de- açúcar, cascas de café, etc), pela sua granulometria dispensam o pré-processamento.

A mesma observação pode ser feita com relação ao uso da parte orgânica dos resíduos sólidos domiciliares. Embora apresentando composição muito variável, sabe-se que, em média, no Brasil, a parte orgânica do lixo doméstico representa 50 a 60% de seu peso total. Após a separação dos materiais recicláveis, a parte orgânica do lixo pode ser misturada ao lodo e compostada. Neste caso, a usina de compostagem deverá dispor de infraestrutura adequada para o processamento do lixo e do lodo.

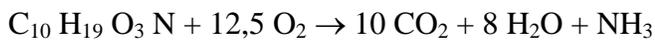
Em função destes fatores, a definição do resíduo estruturante deve ser criteriosa, sendo que em muitos casos, são usados vários resíduos estruturantes para o processo de compostagem.

5.3 . Aeração

Dos parâmetros de controle citados no Capítulo 1, a aeração é sem dúvida o mais importante, uma vez que o processo é aeróbio. É também o mais complexo, pois é o principal fator a definir a tecnologia a ser utilizada, conforme descrito no Capítulo 4. Por esta razão, faz-se necessário aprofundar seu estudo.

No processo de compostagem, a aeração fornece oxigênio à atividade microbiana, remove gás carbônico água e calor. É portanto, um parâmetro complexo, que implica em várias consequências e que define em grande parte a tecnologia de compostagem. O controle eficiente do fornecimento de oxigênio durante o processo de compostagem é o principal fator para o sucesso da operação de uma usina.

Teoricamente, a degradação dos sólidos voláteis biodegradáveis do material a ser compostado pode ser estimada pela reação química de uma molécula biodegradável:



Analogamente, podem ser montadas equações para a oxidação da amônia, celulose e outras moléculas orgânicas. Na prática, o fenômeno é mais complexo, pois a maioria da amônia produzida pode ser volatilizada, o que não criará demanda adicional de oxigênio. No caso da celulose e lignina, apenas parte destas moléculas são biodegradadas.

Com base na equação apresentada acima, são necessárias 2 g de oxigênio por grama de sólidos voláteis biodegradáveis para a oxidação da matéria orgânica biodegradável. Da mesma forma, serão necessários mais 1,2 g para a biodegradação do resíduo estruturante. Estes seriam os limites mínimos de aeração.

Caso o objetivo da aeração seja também o de secar o composto, então a necessidade de ar pode ser 10 vezes maior.

Embora a literatura apresente exemplos de taxa de aeração (Tabela 5.2), é aconselhável que o projeto de uma usina de compostagem seja precedido de um estudo em escala piloto dos resíduos a serem utilizados, para definição de parâmetros mais seguros de projeto.

Tabela 5.2 – Alguns exemplos de taxas de aeração para compostagem de misturas de resíduos contendo lodo de esgoto.

Sistema de compostagem	Exemplos de taxas de aeração para misturas contendo lodo de esgoto	Referência
Leiras revolvidas	No mínimo 3 revolvimentos por semana	Hay et al., 1984
Leiras aeradas estáticas	0,6 m ³ /min/t seca de lodo 2,0 m ³ /min/t úmida de composto para manter a temperatura a 60 °C ventilador de 1 HP para 120-140	Kuter, 1995 Miller& Finstein, 1983

	t úmida de composto	EPA, 1985
Reatores Biológicos	0,24 m ³ /min/t seca de composto	Fernandes et al, 1988

Os exemplos dados na Tabela 5.2 não devem ser tomados como regra geral, pois a demanda de oxigênio é função das características dos resíduos utilizados e das condições de compostagem. Além disso, a demanda de ar é variável durante a compostagem, sendo pequena nos primeiros dias e atingindo seu pico na fase termófila, para em seguida diminuir. Os números apresentados na tabela 5.2 se referem às condições de consumo máximo de oxigênio.

Quando o sistema de compostagem utilizado é o sistema de leiras revolvidas, após 120 minutos do revolvimento, observa-se total ausência de O₂ nas camadas de composto inferiores a 90 cm da superfície da leira. Portanto, para este sistema de compostagem, o revolvimento preconizado de no mínimo 3 vezes por semana visa mais manter as condições termófilas para que a compostagem possa eliminar os patógenos do que manter as condições aeróbias do meio.

No caso da compostagem do lodo em leiras aeradas, observam-se que 20 minutos após se desligar o ventilador as condições do meio se aproximam da anaerobiose (Connery et al, 1985).

5.4. Balanço de Massa

Na fase de projeto a realização de um ensaio piloto, com os resíduos nas condições em que serão usados e aplicando-se a tecnologia a ser utilizada na usina, fornece elementos fundamentais para o dimensionamento e evita problemas futuros.

O balanço de massa deve fixar as proporções de combinação de lodo com o resíduo ou resíduos estruturantes, fornecendo assim parâmetros para o dimensionamento dos pátios de compostagem, áreas para recebimento de resíduos, estocagem e equipamentos necessários.

A realização de um ensaio piloto também permite determinar a duração das fases termófilas e de maturação, parâmetros igualmente importantes no dimensionamento.

Outro parâmetro importante que pode ser obtido através do ensaio piloto é a perda de matéria orgânica durante a compostagem. Como durante o processo de biotransformação, parte da matéria orgânica é degradada em CO₂ e H₂O, havendo uma perda importante de peso, que após a maturação poderá variar de 30 a 60% do peso inicial, em função do teor de matéria orgânica degradada e da quantidade de água evaporada. Este fator se reflete evidentemente nos volumes transportados e no valor final da venda.

Depois de maturado, o composto produzido no ensaio piloto pode ser peneirado, definindo-se assim a taxa de composto rejeitado, que também representa uma perda. É importante lembrar que o composto retido nas peneiras é função direta do tipo de resíduo estruturante utilizado e das características de seu pré-processamento (trituração, relação de combinação, etc).

A tabela 5.3 sugere um quadro básico que resume as informações mais importantes para a realização do balanço de massa a partir de um ensaio piloto. As determinações realizadas em laboratório (teor de umidade / sólidos totais, nitrogênio, etc...) devem ser aplicadas à quantidade total de resíduos processadas diariamente ou mensalmente.

Tabela 5.3 – Sugestão de dados a serem levantados no ensaio piloto de compostagem.

Mistura:											
Data do ensaio:											
Procedência do lodo:						Tipos de Resíduos estruturantes:					
Ítem	Volume Total (m ³)	Peso total (kg)	Teor de sólidos (kg)	Teor de sólidos (%)	Teor de sólidos voláteis (Kg)	% de água	Peso específico (kg/m ³)	C %	N %	C/N	Obs.
Lodo											
Resíduo estruturante											
Mistura											
Composto após fase termófila											
Composto maturado sem peneirar											
Composto peneirado											
Composto retido na peneira											

- O volume total deve ser medido em m³;
- O peso total em kg;
- O teor de sólidos totais (kg) é determinado por secagem em estufa a 105°C de uma amostra representativa;
- O teor de sólidos voláteis (kg) é determinado por calcinação de uma amostra representativa. Este parâmetro define o teor de matéria orgânica dos resíduos e a estabilização do produto final;
- A porcentagem de água é resultante da análise do teor de sólidos totais;
- O peso específico (kg/m³) é um parâmetro importante para o dimensionamento da área de compostagem e para o transporte dos resíduos e do produto final;
- A determinação do teor de C e N é fundamental para a caracterização dos resíduos e para a avaliação do composto maturado.

O primeiro passo para o uso desta tabela síntese é a caracterização dos resíduos, dado básico para a definição da proporção de combinação da mistura ou das misturas.

Após a realização da mistura dos resíduos, faz-se sua caracterização. A medida do teor de sólidos e relação C/N são dados fundamentais nesta fase.

Muitas vezes, o lodo pode não conter o teor de sólidos especificado pela ETE. Caso o teor de sólidos do lodo passe de 20 para 18%, por exemplo, as consequências na mistura são consideráveis. O importante é que o ensaio piloto seja realizado com os resíduos em seu estado típico de utilização.

As medidas realizadas após a fase termófila e após a maturação determinam as perdas de matéria orgânica, água, rejeitos, assim como o grau de evolução do composto.

5.5. Instalações de apoio

A complexidade das instalações de apoio também depende do porte da usina de compostagem. Tratando-se de um local destinado ao processamento de lodo de esgoto, por questões sanitárias, seu perímetro deve ser isolado de modo a impedir a entrada de pessoas estranhas.

Uma portaria principal, não necessariamente com a presença constante de um guarda, é necessária para controlar as entradas e saídas de resíduos e produtos. A necessidade de uma balança para caminhões deve ser avaliada em função do porte da estação e da necessidade de controle do peso dos resíduos e do produto final a ser comercializado.

Um pequeno escritório é importante para manter os controles da operação da usina, centralizar os contatos e o gerenciamento da operação.

Para a boa condução do processo de compostagem é fundamental o controle de alguns parâmetros do processo. Como requisitos mínimos, o controle da umidade, temperatura e pH, pela sua importância, grande frequência de determinações e baixo custo dos equipamentos necessários, podem ser feitos na própria estação. Outros parâmetros tais como nutrientes, metais pesados e análises microbiológicas, podem ser determinados em laboratórios especializados.

Portanto, o “laboratório” da usina de compostagem necessita de uma pequena sala dotada de pia, bancada, balança com capacidade de 2 kg e precisão de 0,01g, pequena estufa, pHmetro e vidrarias básicas como: cacinhos de porcelana, Beakers, piscetas, papel filtro, espátula, etc. Também é interessante dispor de alguns Beakers de 1 ou 2 litros para determinação da massa específica dos resíduos e do composto.

A sofisticação e tamanho do laboratório devem ser adequados ao tamanho da usina e ao nível de controle que se pretende obter. Os equipamentos citados são de baixo custo e suficientes para a determinação de parâmetros simples e muito importantes para o processo de compostagem.

O monitoramento da temperatura pode ser feito com pequenos aparelhos digitais, com sonda metálica, suficientemente robustas para serem cravadas nas leiras de compostagem.

Para as estações de maior porte, que necessitam de vários operários, é necessário dispor de vestiários, instalações sanitárias e refeitório.

As áreas de recebimento de resíduos ou estocagem de resíduos estruturantes devem ser cobertas e impermeabilizadas. Os pátios de compostagem podem ser asfaltados, concretados ou simplesmente impermeabilizados com terra compactada.

Os solos mais propícios à compactação são os solos argilosos, para os quais devem ser feitas as caracterizações granulométricas e ensaio de Proctor para que a compactação permita um coeficiente $K < 10^{-7}$ cm/s.

Em todos os casos, os pátios devem ter sistema de drenagem para captar as águas de chuva e o eventual chorume gerado. Este último pode ser recirculado nas próprias leiras de compostagem.

Se a estação dispuser de máquinas em permanência, é necessário um galpão para abrigá-las. A conveniência de uma pequena oficina deve ser definida em função do grau de mecanização da estação. Estas questões devem ser avaliadas na fase de projeto para que a futura operação da usina não seja prejudicada por imprevistos.

5.6 Equipamentos necessários

A definição dos equipamentos necessários a uma usina de compostagem depende das características do lodo e do resíduo estruturante utilizado, das quantidades de resíduos a serem compostadas, da tecnologia de compostagem escolhida e do tipo de produto final que se espera obter.

Com relação ao lodo, um parâmetro importante é seu teor de sólidos. Normalmente utiliza-se lodos com 15-25% de sólidos, o que permite trabalhar com o lodo no seu estado pastoso, portanto fácil de ser misturado ao resíduo estruturante, permitindo uma mistura final com umidade ideal (55-65%). Dependendo do porte da usina e de seu regime de funcionamento, pode ser necessário que ela seja dotada de uma balança, o que permite pesar as quantidades de resíduos tratados, caso os custos de processamento sejam cobertos por mais de um produtor de resíduo. A balança também permite controlar as proporções de combinação lodo/resíduo estruturante.

A necessidade de pré-processamento do resíduo estruturante definirá se deve haver um equipamento de trituração, por exemplo.

Dispondo-se de resíduo estruturante com granulometria adequada, deve ser feita sua mistura com o lodo da melhor forma possível, operação que pode ser feita por um misturador do tipo canaleta com dois eixos longitudinais rotativos, dotados de garras, ou então por um equipamento misturador no próprio pátio de compostagem.

A pá carregadeira de rodas pode realizar a mistura do lodo com o resíduo estruturante e revolver a leira caso a tecnologia utilizada seja esta. A pá carregadeira também desempenha a função de movimentar os resíduos e carregar caminhões com composto maturado.

Também existem, no mercado, equipamentos misturadores específicos para compostagem, fabricados por empresas brasileiras. Um exemplo é o modelo fabricado pela CIVEMASA (Araras, SP), que produz um modelo de 6,7 m de largura e 1,75 m de altura, devendo ser movido por trator agrícola com tração nas quatro rodas, tomada de força com 540 rpm e potência de 150CV.

Os modelos auto-propelidos são importados, se deslocam sobre as leiras, revolvendo-as e formando novas leiras de 3,50 m de largura e 1,50m de altura.

Caso a tecnologia utilizada seja a de leiras estáticas aeradas, haverá necessidade de sopradores industriais e tubulação para injeção de ar como descrito no Capítulo 4.

Após a maturação, o peneiramento permite separar o composto mais fino do composto a ser rejeitado. Dependendo do resíduo estruturante e do uso final do composto é uma operação que pode ser suprimida, sendo sempre necessária se o público consumidor exigir um composto homogêneo e de melhor qualidade.

Principalmente para o composto peneirado, uma unidade de ensacamento pode ser uma estratégia para valorizar e facilitar a venda do produto.

Os equipamentos mencionados acima são aplicáveis a estações de porte médio e grande. Para pequenos sistemas, é perfeitamente possível um fluxo de processo mais simples e menos mecanizado. É até possível o peneiramento manual.

Para uma pequena estação de compostagem que utiliza um resíduo estruturante previamente fragmentado, controlando volumetricamente as proporções de combinação de resíduo, a mistura pode ser feita com pá carregadeira. Neste caso, a pá carregadeira não precisa estar disponível para a estação o tempo todo. Ela pode desempenhar outras tarefas, caso seja propriedade da Prefeitura, ou até ser uma máquina alugada em momentos bem definidos para realizar o revolvimento e mistura.

Outra opção para as pequenas estações é a instalação de sopradores para a aeração das misturas, o que elimina a necessidade da pá-carregadeira para realizar a aeração.

Portanto, o grau de mecanização e os equipamentos necessários são bastante variáveis e o engenheiro projetista deve usar sua imaginação no sentido de conciliar as alternativas de menor custo, garantindo a segurança sanitária do processo e a boa qualidade do produto final.

5.7. Escolha do local e impactos ambientais

Uma usina de compostagem realiza processamento de resíduos, retendo-os por um certo tempo e em seguida os enviando às áreas de utilização. Seu impacto no meio ambiente é muito menor que um aterro sanitário, que estoca grandes volumes de resíduos por longos períodos.

Embora existam algumas restrições quanto ao meio físico para a escolha da área de uma usina de compostagem, normalmente os critérios estéticos (odor, barulho, transporte) e a atração de vetores são os itens mais relevantes a serem considerados.

Do ponto de vista fisiográfico, devem ser evitadas as áreas próximas a mananciais, pois o local pode estar sujeito à erosão e transporte de resíduos pela chuva. Áreas com o lençol freático pouco profundo também devem ser evitadas por uma questão de segurança ao risco de contaminação da águas do subsolo.

O terreno deve ser plano ou ligeiramente inclinado, para facilitar a instalação e operação da usina, assim como dos equipamentos necessários. Áreas com grande inclinação, além de dificultar as obras também são mais sujeitas à ação das águas pluviais que podem transportar o lodo por erosão.

Mesmo sendo bem operada, por estar recebendo constantemente o lodo, haverá algum odor gerado pela usina. Sob este aspecto é interessante saber a direção dos ventos dominantes, para que os odores não sejam enviados às áreas habitadas. Também é importante que entre a estação e a zona urbana haja uma área de transição, não habitada, para a dissipação dos odores.

O plantio de árvores no perímetro da estação é uma medida duplamente benéfica, impedindo que o vento transporte odores para a vizinhança, criando uma barreira verde, e tornando a paisagem mais agradável.

O impacto da instalação da usina no tráfego também deve ser considerado, pois caminhões transportando lodo, mesmo coberto com lona, podem espalhar odores e caso circulem por vias congestionadas, podem gerar reações negativas à usina.

Alguns impactos causados à instalação da usina podem ser minimizados por medidas adequadas de projeto e operação.

Um calendário conveniente de transporte e descarregamento de lodo, pode minimizar o problema de odor e tráfego, além de evitar o armazenamento de grandes volumes de lodo na usina. Os revolvimentos, principalmente no início do processo, também devem ser feitos em dias de pouco vento.

O risco de contaminação de águas do subsolo e carreamento do lodo pela erosão superficial da chuva, pode ser controlado pela impermeabilização das áreas mais afetadas, e pela implantação de um adequado sistema de drenagem.

A área escolhida não deve ser próxima a zonas habitadas, porém, não devem ser muito distantes das ETEs. É possível instalar a usina próxima ou na área da própria ETE, desde que haja espaço disponível.

Em todos os casos, a lei de zoneamento urbano deve ser observada. Quando a cidade dispuser de um Plano Diretor, é importante que a proposta da usina de compostagem de lodo atenda as diretrizes pré estabelecidas no mesmo.

5.8. Levantamento de mercado

As perspectivas de demanda do composto a ser produzido devem ser avaliadas de maneira preliminar na fase de decisão sobre qual alternativa a ser adotada para o destino final do lodo de esgoto.

Na fase de projeto da usina, a perspectiva de mercado para o composto já deve ser um fato conhecido, porém ela pode ser aprofundada, até porque, a definição dos perfis dos futuros clientes pode ter reflexos nas próprias características de projeto da usina.

Como já foi exposto, um teste piloto com a tecnologia escolhida e os resíduos a serem utilizados, é útil para a definição do balanço de massa e o composto produzido, nesta ocasião, pode ser mostrado aos futuros consumidores para se ter uma idéia mais precisa sobre o valor que o mercado está disposto a pagar pelo produto.

Dependendo do tipo de cliente, pode haver preferência por um composto de granulometria mais fina ou grossa, necessidade de ensacar o composto ou vendê-lo a granel. Caso o uso predominante seja a produção de mudas, o composto mais fino será melhor, enquanto se o uso for agrícola, este fator passa a ser secundário. O teor de umidade final é outro aspecto importante. Até a escolha do resíduo estruturante pode ser influenciada pelo perfil do cliente: cooperativas agrícolas podem dispor de resíduos estruturantes do tipo bagaço de cana-de-açúcar, cascas de café e outros resíduos que poderiam ser utilizados na compostagem. Neste caso, a usina pode ser até implantada em sistema de parceria,

pois as cooperativas também podem ter interesse em adquirir composto de boa qualidade e fornecê-lo a seus cooperados.

Esta hipótese vale também para as Prefeituras Municipais, que normalmente não gerem os problemas do lodo, porém são responsáveis pelo destino final de resíduos de podas de árvores e capinas, lixo urbano, resíduos de feira, etc.

As Prefeituras também têm necessidade de composto para ajardinamentos, conservação de canteiros, produção de mudas ou recuperação de áreas degradadas.

Portanto, é muito interessante, que na fase de projeto da usina, seja feito um levantamento mais detalhado do mercado e que se procure parcerias, pois podem ter reflexos na própria concepção da usina e nas características do composto a ser produzido.

CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES SOBRE A OPERAÇÃO DA USINA

A compostagem é um processo biotecnológico de transformação da matéria orgânica. Logo, para ser bem sucedido, é fundamental que seja controlado, respeitando-se os parâmetros físico-químicos citados em 1.3, para que os microrganismos encontrem condições ideais de se desenvolverem, transformando a matéria orgânica fresca em húmus e substâncias estáveis.

Este conceito precisa ser enfatizado, pois no Brasil, nas usinas de compostagem de lixo urbano, foi dada muita ênfase à infra-estrutura mecânica necessária ao processo de triagem e separação de resíduos e muitas vezes quase nenhuma atenção foi dada à compostagem em si, que no caso do lixo doméstico, só tem início após a separação da parte orgânica e sua disposição em leiras ou reator. Por esta razão, algumas pessoas leigas passaram a identificar o processo de compostagem como um processo mecânico de triagem, o que é obviamente uma idéia falsa.

No caso da compostagem do lodo, o monitoramento do processo deve incluir:

- O controle de qualidade dos resíduos a serem compostados;
- O controle do pré-processamento dos resíduos estruturantes, caso seja necessário;
- Evolução do processo de compostagem;
- Características do produto final;
- Características do produto beneficiado, caso exista esta etapa.

6.1 - Controle de qualidade dos resíduos a serem compostados

É necessário realizar a caracterização completa do lodo antes de se discutir qualquer alternativa para seu destino final. Uma estação de tratamento, por exemplo, que recebe esgotos industriais em altas doses e produz lodo com elevada concentração de metais pesados, automaticamente exclui qualquer possibilidade de compostagem e uso agrícola.

Portanto, em princípio, se a alternativa de tratamento do lodo escolhida foi a compostagem, é porque o lodo está apto para tal. Se a empresa de saneamento tem uma política bem definida e criteriosa para o recebimento de esgotos industriais na rede coletora, não há motivos para se esperar que as características do lodo mudem substancialmente.

Por outro lado, mudanças no sistema de tratamento de esgotos ou no sistema de desidratação de lodo, podem ter bastante influência no possível sistema de compostagem que venha utilizá-lo.

Caso as características do esgoto e tipo de sistema de tratamento assim como o sistema de desidratação do lodo não sofram alteração, a tendência é que as características do lodo apresentem pouca variação.

No entanto, alguns imprevistos podem ocorrer em função de ligações industriais clandestinas na rede de esgoto, falhas na operação da ETE ou mudanças no sistema de desidratação do lodo. Portanto, é fundamental proceder ao monitoramento das características do lodo que chega na estação de compostagem.

Quanto aos resíduos estruturantes, a atenção deve ser ainda maior, pois eles estão sujeitos a maiores variações no que diz respeito à sua granulometria, teor de umidade e composição química. Além disso, em muitas situações a usina poderá operar com dois ou mais resíduos estruturantes, o que pode ter efeitos muito importantes na sua relação de combinação com o lodo e no desenvolvimento do processo de compostagem.

Uma análise microbiológica e físico-química completa do lodo e de todos os resíduos estruturantes deve ser realizada ainda na fase do teste piloto, conforme sugerido no Capítulo 5.

Os parâmetros recomendados para avaliação são os seguintes:

- pH
- Teor de sólidos totais / umidade;
- Teor de sólido fixos e voláteis;
- Nitrogênio total;
- Carbono total;
- Relação C/N;
- Fósforo total;
- Potássio total;
- Cálcio total;
- Magnésio total;
- Enxôfre total;
- Sódio total;
- Metais pesados totais (Cadmio, Mercúrio, Chumbo, Níquel, Cromo , Zinco e Cobre);
- Coli fecal;
- Ovos e larvas de helmintos, com teste de viabilidade para os ovos.

Quanto à frequência de amostragem, como o lodo é o resíduo que requer maior controle, pode-se seguir as indicações da “Proposta Preliminar de Norma Técnica para Uso Agrícola do Lodo de Esgoto “ elaborada pela SANEPAR- Companhia de Saneamento do Paraná, que desde 1992 faz pesquisas sobre a reciclagem agrícola do lodo, com um grupo de mais de 60 pesquisadores de onze Instituições de Ensino e Pesquisa oficiais, e que tem portanto dados consolidados sobre o tema (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 - Frequências de amostragem para determinações das características do lodo, propostas pela SANEPAR

Produção de lodo na ETE (t/ano de matéria seca	Frequência de amostragem
Até 60	Anual
De 60 a 240	Semestral
Acima de 240	A cada lote de 240 toneladas de matéria seca

Para o controle de qualidade dos resíduos estruturantes pode ser adotada a mesma frequência proposta para o lodo .

As frequências propostas na Tabela 6.1 podem ser seguidas desde que as características do sistema de tratamento de esgotos e dos resíduos estruturantes sejam estáveis. Caso contrário, após qualquer mudança significativa, nova caracterização deve ser feita.

Além da caracterização completa de cada resíduo, devem ser monitorados, rotineiramente, alguns parâmetros simples e importantes para o processo de compostagem. É essencial controlar :

- a) O teor de umidade, pois sua determinação é fundamental para a correta combinação entre os resíduos, lembrando que o teor de umidade ideal na mistura final deve estar compreendido entre 55 e 65%
- b) O pH , para averiguar se algum dos resíduos apresenta características muito ácidas ou básicas.

Estas determinações podem ser feitas na própria estação de compostagem, conforme descrito em 5.5.

6.2 - Procedimentos e controle do processo de compostagem

Efetuada o controle de qualidade dos resíduos a serem compostados, o passo seguinte é a determinação das proporções de combinação entre os resíduos.

A título de demonstração, supondo que uma estação de compostagem esta operando com lodo de esgoto e resíduos de podas de árvores com as características mostradas pela Tabela 6.2.

Tabela 6.2. - Características dos resíduos utilizados no exemplo para determinação da composição da mistura a ser compostada

Resíduo	%Sólidos	N%	C%	C/N
Podas de árvores	70	1,10	51,33	46,6
Lodo de esgoto	29	5,06	38,02	7,51

Os dois principais parâmetros a serem ajustados são o teor de umidade e a relação C/N . A proporção de combinação entre os resíduos pode ser calculada à medida em que é fixado um valor para cada um desses parâmetros, sendo que no caso da umidade, sempre que possível , por facilidade operacional, deve ser definida uma proporção de combinação de resíduos que permita á mistura final apresentar o teor de umidade ideal sem adição suplementar de água.

O cálculo pode ser feito de maneira simples tomando por base que a relação C/N da mistura final é a razão entre o total de carbono presente na mistura e o total de nitrogênio.

Relação C/N = Total de carbono da mistura / Total de nitrogênio da mistura

Neste exemplo, a relação C/N dos resíduos de podas de árvores é de 46,6 , contra 7,51 do lodo. Uma mistura de lodo e podas de árvores em partes iguais , em peso seco, levará à seguinte relação :

Relação C/N da mistura = $51,33 + 38,02 / 1,1 + 5,06 = 14,5$

A unidade na qual é feita a estimativa não importa, pois busca-se uma relação entre duas quantidades. Como o teor de carbono e nitrogênio são expressos em porcentagem, o cálculo é mais imediato considerando-se os valores relativos a 100 g de material, como já mostrado.

No exemplo acima, a relação C/N encontrada é muito baixa, o que implicará em excesso de nitrogênio na mistura final e volatilização de amônia. Para elevá-la, será necessário aumentar a quantidade de resíduos de podas .

Neste caso, fixando-se uma relação C/N de 25 e mantendo-se 1 parte em peso de lodo para “x” partes de resíduos de podas, monta-se uma equação de primeiro grau , chegando-se a 1 parte de lodo, em peso, para 3,7 partes de resíduos de podas .

Analogamente, determina-se o teor de umidade da mistura:

Teor de umidade na mistura = Total de água na mistura / Total de peso da mistura

Portanto, para que a mistura final apresente 54% de umidade, seria necessário misturar 1,5 partes de lodo para 1 parte de resíduo de podas, situação que leva a uma relação C/N de 12,47, que é muito baixa.

Para resolver este problema há três soluções possíveis:

- a) Adicionar água às misturas, o que é sempre uma operação tecnicamente trabalhosa
- b) Utilizar o lodo com maior teor de umidade
- c) Utilizar um resíduo estruturante mais úmido ou um resíduo complementar, com maior teor de água, como por exemplo, lodo de ETA adensado.

A Tabela 6.3 resume as possibilidades de combinação entre os dois resíduos, sem adição de água.

Tabela 6.3- Características das misturas preparadas com várias alternativas de combinação de resíduo de podas de árvores e lodo

Relação resíduo de podas/ lodo de esgoto (em peso seco)	Relação C/N da mistura	Umidade da mistura (%)
3/1	23,0	40
2,5/1	21,3	41
2,0/1	19,4	43
1,5/1	17,1	46
1/1	14,5	50
1/1,5	12,5	55
1/2,0	11,3	57
1/2,5	10,6	59
1/3,0	10,1	61

Uma vez definida as proporções de combinação entre os resíduos, as quantidades a serem misturadas podem ser determinadas por peso ou por volume. O valor em peso pode ser transformado em volume conhecendo-se o peso específico dos resíduos, determinação simples de ser feita na própria estação de compostagem.

O passo seguinte é obter uma mistura a mais homogênea possível entre o lodo e o resíduo estruturante. A mistura homogênea apresenta porosidade uniforme, o que garante a boa circulação de ar na massa do composto. Misturas com porosidade variável, ou com lodo em pelotas, criam curto circuitos de aeração, propiciando o aparecimento de zonas de anaerobiose.

No momento da mistura é recomendável adicionar um pouco de composto em fase de semi-maturação. Este procedimento é útil, pois os resíduos frescos contém microrganismos nem sempre adaptados ao processo de compostagem, o que pode ter como consequência um certo atraso na elevação do nível de atividade biológica.

Vários pesquisadores investigaram a eficácia da adição de inoculantes contendo microrganismos específicos aos resíduos em processo de compostagem. Efetivamente,

existem grupos de microrganismos mais aptos a degradar determinados tipos de substratos, porém em geral, estes trabalhos mostraram que devido à grande variedade e quantidade de microrganismos presentes nas misturas durante a compostagem, a população de microrganismos específicos se restringe, devido à competição, o que leva a evoluções parecidas entre misturas inoculadas com microrganismos específicos e as não inoculadas.

A prática de misturar aos resíduos em início de compostagem, um composto em estado de semi-maturação, na proporção de 5 a 10% de seu volume, teve seu efeito positivo comprovado em inúmeros experimentos, pois esta inoculação traz consigo uma população já selecionada para o processo de compostagem.

Após a montagem das leiras, a temperatura e a aeração são os dois parâmetros mais importantes de serem monitorados.

A temperatura pode ser medida diariamente e representa um reflexo da atividade microbiológica. Sua elevação rápida a patamares termofílicos, nos primeiros dois ou três dias de compostagem, indica que o processo está se desenvolvendo bem. Caso contrário, devem ser procuradas as causas do baixo nível de atividade microbiológica.

O monitoramento da temperatura também é necessário para garantir a eficiência do processo na inativação dos microrganismos patogênicos.

A aeração, obviamente, é um parâmetro fundamental para o processo de compostagem. Nos sistemas mais simples será difícil monitorá-la. Neste caso, seu controle se faz através dos revolvimentos ou da injeção ou aspiração do ar na massa do composto, de acordo com os parâmetros citados em 5.3. Nas estações maiores, pode-se fazer uso de medidores específicos para controlar o teor de O_2 nos gases de exaustão ou na massa do composto, o que é útil para controlar as vazões de aeração.

O teor de umidade na leira é outro parâmetro importante e fácil de ser controlado. Sua determinação pode ser feita a cada 3-4 dias e caso seu valor esteja inferior a 50% é necessário adicionar água às misturas, pois do contrário, o nível de atividade microbiológica será limitado. No caso da compostagem em leiras revolvidas, a adição de água, quando necessária, pode ser feita durante o revolvimento para obter maior homogeneidade do produto.

Quando o processo de compostagem se desenvolve em condições satisfatórias, ao final da fase termófila a temperatura cai rapidamente aos patamares mesófilos, o que indica o final da fase de bioestabilização ou degradação rápida. Nesta fase os componentes facilmente biodegradáveis já foram transformados, o composto apresenta odor agradável, é fácil de manipular, e os microrganismos patogênicos desapareceram ou foram reduzidos a níveis seguros.

Terminada a fase termófila, o composto pode ser transportado ao pátio de maturação.

6.3 - Controle de qualidade da maturação e do produto final

Após a fase termófila, o composto está estabilizado, mas ainda não está maturado. Epstein (1997) diferencia estas duas características, definindo *estabilização* como um estágio de decomposição da matéria orgânica, sendo função da atividade biológica, enquanto a *maturação* é uma condição organo-química do composto que indica a presença ou ausência de ácidos orgânicos fitotóxicos e presença moléculas húmicas e pré-húmicas.

A fitotoxicidade de um composto pode ser provocada pela presença do nitrogênio amoniacal, dióxido de carbono e ácidos orgânicos variados.

Um composto instável, continua a se decompor rapidamente e se for estocado entrará em degradação anaeróbia, liberando mau odor e até gases inflamáveis como metano e fosfina, capazes de criar combustão na massa de resíduos.

Um composto maturado pode ser estocado ou ensacado sem qualquer problema de odor ou liberação de gases. Seu odor é parecido com o de terra úmida e sua ação no solo não provoca efeitos fitotóxicos.

Durante a fase de maturação, as necessidades do processo de compostagem são diferentes das necessidades da fase termófila. A atividade microbiológica é baixa, o que implica em pequena necessidade de aeração, sendo predominantes, os fenômenos de natureza química e bioquímica, principalmente as reações de polimerização de moléculas de ácidos húmicos e fúlvicos.

6.3.1 - Maturação

De acordo com um dos grupos pioneiros no estudo científico da compostagem (Departamento de engenharia sanitária da Universidade da Califórnia, 1953) *um composto é considerado maturado e pronto para uso quando ele pode ser estocado em grandes leiras, indefinidamente, sem criar condições de anaeróbiose ou gerar calor, podendo ser aplicado em solos agrícolas sem efeitos negativos, devido sua baixa relação C/N e pobre disponibilidade de carbono.*

Na experiência dos autores, para os compostos produzidos com lodo de esgoto, cuja fase termófila tenha sido bem definida, com desenvolvimento satisfatório da temperatura, boa aeração e relação C/N ideal, um período de maturação de 2-3 meses, com revolvimentos mensais e umidade mantida em torno de 40%, normalmente é suficiente, para a obtenção um composto em excelente estado de maturação.

Seguindo estes cuidados, se o composto apresentar temperatura ambiente, odor de húmus, e se, ao ser comprimido nas mãos, formar uma massa consistente, recobrando as

mãos com uma camada preta de húmus coloidal, é sinal de que o composto está bem maturado (Kiehl, 1998).

Existem, porém, vários métodos analíticos para determinação da maturação do composto. A Tabela 6.3 cita os métodos disponíveis para esta finalidade.

Tabela 6.3 - Relação dos métodos para avaliação da maturação de um composto

Método	Parâmetros
Químico	<ul style="list-style-type: none">• Relação C/N• Formas químicas do nitrogênio• pH• Capacidade de troca catiônica• Constituintes químicos• Parâmetros de humificação (vários)• Densidade ótica
Físico	<ul style="list-style-type: none">• Temperatura• Cor, odor, peso específico
Biológico	<ul style="list-style-type: none">• Germinação de sementes de agrião• Germinação de sementes de trigo• Cor da raiz das plantas
Microbiológico	<ul style="list-style-type: none">• Respirometria• Alterações microbiológicas na população presente• Atividade enzimática

Os métodos apontados têm complexidade de execução variável. Alguns são bastante utilizados, outros raramente são aplicados.

O pH é um parâmetro fácil de ser determinado. De acordo com Kiehl (1998), pH inferior a 6,0 indica composto em fase inicial de processo, portanto apresentando fitotoxicidade. Com pH entre 6,0 e 7,5 o composto está estabilizado e com pH acima de 7,6 o composto está maturado. A experiência dos autores, compostando lodo de esgoto (PROSAB), mostrou que se a maturação prossegue por mais alguns meses, o composto volta a baixar seu pH, atingindo níveis de 5,5 - 6,0, provavelmente devido à intensificação da nitrificação. Portanto este parâmetro é útil nos intervalos de tempo usuais de maturação.

Outra maneira de avaliação da maturação é pelo teor de nitrogênio amoniacal e nítrico. O nitrogênio ligado à matéria orgânica é inicialmente liberado sob a forma amoniacal. Em um composto pouco maturado, grande parte do nitrogênio estará sob a forma amoniacal, enquanto um composto maturado apresentará a maior parte de seu nitrogênio na forma nítrica.

Ao coletar a amostra para determinação do nitrogênio, também pode ser determinado o teor de carbono, o que permitirá o cálculo da relação C/N, que é um dos parâmetros de maturação. Se a relação C/N for inferior a 20, ela indica que o composto está maturado. Porém é importante comparar a relação C/N após a maturação com a mesma relação em início do processo, pois como o lodo é muito rico em N, dependendo da proporção utilizada, há possibilidade da relação ser baixa desde o início do processo, o que limita a validade deste indicador.

O teste de germinação de sementes de agrião é fácil de ser feito e reflete a ação do composto nas plantas, é uma alternativa interessante de ser empregada. O agrião é uma das plantas mais sensíveis à ação fitotóxica do composto mau maturado.

O teste respirométrico é um pouco mais trabalhoso, porém apresenta resultados muito confiáveis, pois reflete diretamente o nível de atividade microbológica de uma amostra de composto.

Este método é baseado na produção de CO_2 pela atividade metabólica dos microrganismos. Uma amostra de resíduo pouco estabilizado contém elevado teor de matéria orgânica biodegradável, permitindo intensificação da atividade microbológica e consequente produção de CO_2 . O inverso acontece com um composto já maturado, onde o nível de atividade microbológica é baixo.

Para realizar o teste, uma amostra de composto é colocada em um recipiente fechado, onde o CO_2 desprendido é retido por uma solução alcalina, o que provoca uma reação de carbonatação. A solução pode ser titulada periodicamente por meio de um ácido, dando como resultado a taxa de produção de CO_2 , em mg/CO_2 por grama de composto por dia. A Tabela 6.4 relaciona a taxa de respiração com as características do composto.

Tabela 6.4 - Índice de estabilidade e maturação do composto com base na evolução da produção de CO₂ (fonte : E & A Environmental Consultants INC, 1994, citado por Epstein, 1997)

Taxa de respiração (mg CO ₂ -C/g de composto por dia)	Classificação	Características
<2	Muito estável	Bem maturado, odor de humus
2-5	Estável	Composto maturado, impacto mínimo na dinâmica do solo
5-10	Moderadamente estável	Maturação incompleta. Odor potencial. Pode imobilizar o nitrogênio do solo e provocar efeitos fitotóxicos. Não deve ser utilizado em contato direto com sementes de plantas
10-20	Composto instável	Muito imaturo. Odor agressivo e alto potencial de fitotoxicidade.
>20	Muito instável	Resíduo externamente instável, odor ofensivo forte e alta fitotoxicidade. Não recomendável para uso.

Estes métodos de avaliação da maturação combinam facilidade de execução com fiabilidade do parâmetro analisado. No entanto têm seus limites, como foi comentado .

Para estações menores, o controle adequado da fase termófila e da maturação, aliado a um parâmetro simples, como a relação C/N, pH ou teste de germinação , permitem definir com segurança o grau de maturação requerido para que o composto seja liberado para uso sem riscos.

6.3.2 - Beneficiamento do composto

O beneficiamento do composto é o tratamento final que vai adequar o produto às exigências do mercado. Como apresentado em 5.8, de acordo com a demanda por determinado produto, a usina deverá dispor de equipamentos de beneficiamento para adequar as características do produto final.

Secagem

O composto não deve ser extremamente seco, pois neste caso haverá eliminação dos microorganismos e insolubilização de alguns nutrientes minerais (Fernandes, 1989).

Também não é bom que o composto apresente alto teor de umidade, pois isto implica no transporte de grande quantidade de água, o que encarece o produto final para o consumidor.

Pela legislação brasileira, o máximo teor de umidade permitido é 40%, o que é um bom valor, conciliando a garantia de suas propriedades biológicas e químicas com compatibilidade dos custos de transporte.

A diminuição do teor de umidade do produto final, caso seja necessária, pode ser feita por revolvimento da leira ou por insuflação de ar na massa do composto.

Peneiramento

Esta operação tem por finalidade uniformizar a granulometria do composto. De acordo com Kiehl (1998), um composto com granulometria entre 6 mm e 12 mm é muito atrativo aos agricultores.

O peneiramento separa o composto de melhor qualidade, do rejeito, que pode ter uma destinação menos nobre, ou então voltar ao início do processo de compostagem, atuando como resíduo estruturante.

Granulação

O composto de lodo de esgoto maturado pode passar por um granulador cilíndrico, que aplica um jato de água atomizada, para adequar sua consistência, sendo que após a formação dos grânulos, o excesso de água é removido através de um secador.

Os grânulos devem em seguida ser peneirados de acordo com a legislação vigente.

No Brasil já existem indústrias granulando fertilizantes orgânicos e organo-minerais. Os grânulos também podem ser utilizados como “carga” pelos fabricantes de fertilizantes minerais.

Este tratamento tem custo importante, porém valoriza muito o produto final, podendo ser implantado desde que haja uma demanda definida.

Acondicionamento

Na maioria das vezes o composto é vendido a granel. Caso haja demanda pelo produto embalado, se o composto tiver mais de 18% de umidade, ele deve ser ensacado nas chamadas “sacarias respiráveis”, de tecido feito com fitas trançadas de polipropileno

(Kiehl, 1998). Se for embalado em saco plástico impermeável, o fertilizante orgânico úmido e assim fechado, desprende vapor d'água que se condensa na parede interna do saco, favorecendo a formação de bolor no adubo, o que causa má impressão ao consumidor final.

6.3.3- Qualidade e segurança do produto final

Do ponto de vista da engenharia sanitária, ou da gestão do problema do lodo de esgoto, os objetivos da compostagem são :

- Eliminar ou reduzir a níveis seguros os microrganismos patogênicos do lodo
- Continuar o processo de estabilização do lodo, decompondo as moléculas causadoras do mau odor
- Diminuir o teor de umidade inicial do lodo
- Produzir um composto maturado, com boas qualidades agronômicas, fácil de manipular, que atenda às demandas do mercado.

A qualidade do produto final deve ser normatizada por legislação específica, pois o composto, produto final da compostagem, não é um produto único, podendo sua qualidade variar de excelente a péssima, de acordo com os resíduos e processos empregados.

Provavelmente, devido ao fato do problema do lodo de esgoto ser relativamente novo no Brasil, não há normas para a correta classificação dos processos de tratamento do lodo e qualidade do produto final gerado.

A Portaria n.1 de 4 de março de 1983, define alguns parâmetros que devem ser respeitados para o composto em geral, que é colocado à venda no mercado. Esta Portaria fixa parâmetros genéricos, sendo que um bom composto de lodo de esgoto pode apresentar características muito superiores aos critérios nele definidos. Por outro lado, a Portaria não toca em questões importantes como os metais pesados e microrganismos patogênicos.

A análise aqui desenvolvida concilia os parâmetros fixados pela Portaria n.1 de 4 de março de 1983, com Normas Internacionais definidas para o uso agrícola do lodo de esgoto e com a “Proposta Preliminar de Norma Técnica para a Reciclagem Agrícola do Lodo de Esgoto” elaborada pela SANEPAR.

A Tabela 6.5 mostra alguns parâmetros fixados pela Portaria n.1 e os mesmos parâmetros determinados em composto obtido com lodo de esgoto

Tabela 6.5 - Parâmetros fixados pela Portaria n.1 e valores dos mesmos parâmetros encontrados nos compostos produzidos com lodo de esgoto

Parâmetro	Portaria n.1 de 4 de março de 1983	Lodo de esgoto anaeróbio e podas de árvores	Lodo de esgoto aeróbio e bagaço de cana-de-açúcar	Lodo de esgoto aeróbio e podas de árvores
Matéria orgânica total	Mínimo de 40%	70	50	50
N total	Mínimo de 1,0%	3,10	1,10	2,10
Umidade	Máxima de 40%	40	35	54
Relação C/N	Máximo de 18/1	12/1	12/1	10/1
pH	Mínimo de 6,0	7,0	6,5	6,8

Como foi comentado , a Portaria é genérica e diz respeito ao composto obtido com qualquer tipo de resíduo. No caso do composto contendo lodo, os demais nutrientes minerais também estão representados de forma expressiva, conforme mostra a Tabela 6.6

Tabela 6.6 - Teor de nutrientes minerais presentes em compostos produzidos com lodo de esgoto

Composto	pH	M.O.	N%	P%	K%	Ca%	Mg%	S%	C/N
Lodo anaeróbio e podas de árvores	7,0	70	3,10	0,50	0,40	1,01	0,17	0,72	12
Lodo aeróbio e bagaço de cana	6,5	50	1,1	0,40	0,14	0,68	0,15	-----	12

As propriedades agronômicas do composto não se limitam ao seu teor de nutrientes minerais. Mesmo assim os nutrientes tem uma função importante na melhoria da fertilidade do solo, o que justifica a necessidade de sua determinação analítica e sua divulgação aos agricultores e agrônomos, para a definição de um plano geral de adubação. O composto não deve ser visto como um substituto do adubo mineral , mas sim como um condicionador de solo, cujo uso , permite melhorar suas condições gerais a

longo prazo , fazendo com que as plantas aproveitem melhor o adubo mineral incorporado.

Além das características agrônômicas, a presença de microrganismos patogênicos é outro aspecto que precisa ser monitorado.

A normatização sobre a qualidade sanitária de um composto depende de legislação específica, que é variável em cada país. Em alguns países como nos Estados Unidos, há uma classificação para o processo ao qual o lodo é submetido e uma avaliação das qualidades do produto final.

Nos Estados Unidos a legislação que define a classificação do composto produzido com lodo de esgoto é a EPA 40 CFR part 503. Esta norma classifica em dois grupos, os processos de tratamento do lodo, entre os quais a compostagem, definindo critérios para que o processo seja considerado mais ou menos eficiente:

PFRP - Process to Further Reduce Pathogens

- Quando utilizando um processo de compostagem em reatores ou leiras estáticas aeradas, a temperatura do composto é mantida a 55 °C ou mais por pelo menos 3 dias.
- Quando utilizando o sistema de leiras revolvidas, a temperatura é mantida a 55 °C por 15 dias ou mais, sendo que neste período o composto deve ser revolvido no mínimo 5 vezes.

PSRP - Process to Significantly Reduce Pathogens

- Quando utilizando qualquer método de compostagem, a temperatura do composto é mantida a 40 °C ou mais por pelo menos 4 dias. Durante estes 4 dias , por pelo menos 4 horas, a temperatura deve ultrapassar os 55 °C.

Com relação ao produto obtido, a 40 CFR part 503 define lodo (ou composto obtido a partir do lodo) em classe A e classe B. O produto classe A não tem qualquer restrição de uso e pode ser comercializado em sacos plásticos sem controle de aplicação , já o produto classe B tem uso limitado à agricultura, tendo seu uso proibido para horticultura e gramados públicos.

Para o produto classe A são fixados os seguintes limites biológicos:

- < 1.000 C.F. em NMP/g de matéria seca
- ou
- < 4 salmonellas em NMP/ 4 g de matéria seca

Complementarmente, o composto de biossólidos classe A deve apresentar

- < 1 ovo de helminto viável / 4 g de matéria seca

Para o produto classe B ,o requisito é :

- $< 2 \cdot 10^6$ C.F. em NMP / g de matéria seca.

Na França ,a nova regulamentação para uso agrícola do lodo de esgoto (8 de janeiro de 1998), fixa os seguintes limites para os lodos higienizados:

- Salmonellas : < 8 NMP / 10 g de matéria seca
- Enterovirus : < 3 NPPUC / 10 g de matéria seca
- Ovos de helmintos : < 3 ovos viáveis / 10 g de matéria seca

A título ilustrativo , a Tabela 6.7 mostra como em vários países existe a preocupação em se definir parâmetros para que o processo de compostagem seja considerado satisfatório do ponto de vista sanitário. Estes critérios fixam condições de temperatura e tempo de exposição , os dois fatores que definem a eficiência da compostagem na desinfecção lodo, para que o processo seja considerado satisfatório, do ponto de vista sanitário.

Tabela 6.7 - Requisitos de tempo e temperatura fixados em vários países para garantir a qualidade sanitária do composto

País	Sistema de compostagem	Tempo e temperatura
Áustria	-----	$> 60^{\circ}\text{C}$ por pelo menos 6 dias
Dinamarca	-----	$> 55^{\circ}\text{C}$ por pelo menos 2 semanas
Alemanha	Leiras revolvidas em local aberto	$> 55^{\circ}\text{C}$ por pelo menos 2 semanas ou $> 65^{\circ}\text{C}$ por 1 semana
	Leiras revolvidas em local fechado	$> 60^{\circ}\text{C}$ por pelo menos 1 semana
	Reator biológico	
Itália	-----	$> 65^{\circ}\text{C}$ por 2-3 dias consecutivos , sendo que o produto final deve ser biologicamente estável para prevenir o ressurgimento de patógenos
Suiça	-----	$> 55^{\circ}\text{C}$ por pelo menos 3 semanas $> 60^{\circ}\text{C}$ por pelo menos 1 semana

(fonte : Strauch, 1997)

Pela proposta da SANEPAR, os parâmetros biológicos a serem monitorados são os ovos de helmintos, com teste de viabilidade e os coliformes fecais (Tabela 6.8)

Tabela 6.8 - Limites fixados pela proposta de Norma Técnica da SANEPAR para a reciclagem do lodo de esgoto ou composto obtido a partir dele.

Parâmetro	Limites
Ovos de helmintos viáveis	0,25 ovos / g de matéria seca
Coliformes fecais	10^3 NMP / g de matéria seca

Considerando o perfil de saúde da população brasileira, que é muito contaminada por parasitas intestinais e a importância dos coliformes como indicadores, o controle destes dois parâmetros parece ser uma proposta sensata e adequada ao controle sanitário do composto obtido a partir do lodo de esgoto.

Os metais pesados, pela sua vinculação com a atividade industrial, que pode contaminar os efluentes líquidos implicando em riscos ambientais, devem ser controlados no produto final.

Sabe-se que em grande parte, os riscos associados aos metais pesados se deve ao fato que estes metais são cumulativos no solo e nos organismos vegetais e animais. Sua dinâmica no solo ainda apresenta muitas lacunas de conhecimento e os metais presentes no lodo e no composto ainda apresentam complexidade maior, pois formam quelados com compostos orgânicos, o que os tornam muitas vezes indisponíveis para as plantas.

O monitoramento do teor de metais é feito com base na análise do teor de metais pesados totais, mesmo que boa parte deles esteja indisponível. A dosagem dos metais pesados totais pressupõe que a amostra de composto passou por uma digestão ácida total, onde normalmente são utilizados os ácidos nítrico, clorídrico ou sulfúrico, ou então uma combinação entre eles.

A normatização internacional referente à questão dos metais pesados presentes no lodo de esgoto e à sua reciclagem agrícola, fixa limites de metais pesados para:

- Limites de teores de metais pesados acima dos quais o lodo é inapto para a reciclagem agrícola
- Limites de teores acima dos quais o solo fica inapto para receber lodo
- Limites de doses cumulativas de metais aplicados aos solos, o que normalmente se traduz pela limitação de doses de aplicação de lodo em uma mesma área, normalmente pelo período de 10 anos.

No Brasil, a disponibilidade de dados sobre a dinâmica dos metais pesados no ambiente é pequena e o problema é agravado pela acidez da maioria dos solos brasileiros, o que facilita a mobilidade destes metais.

A proposta preliminar de Norma Técnica da SANEPAR fixa limites de metais pesados no lodo e no solo (Tabela 6.9) para que o lodo possa ser reciclado na agricultura. Mesmo considerando que no caso da compostagem o lodo será misturado ao resíduo estruturante, que normalmente é um resíduo vegetal pobre em metais, o que causa uma diluição do teor de metais pesados, devem ser observados os limites fixado por esta Norma para que o lodo possa ser compostado. Os resíduos estruturantes também devem ter seu teor de metais determinado, pois principalmente aqueles provenientes de

industrias (serragem de madeira, por exemplo), não estão totalmente isentos de contaminação.

Tabela 6.9 - Limites de metais pesados no lodo e no solo fixados pela proposta de Norma da SANEPAR

Elemento	Valor limite no lodo (mg/Kg matéria seca)	Valor limite no solo (mg/ Kg matéria seca)
Cd	20	1
Cu	1.000	50
Ni	300	30
Pb	750	50
Zn	2.500	150
Hg	16	1
Cr	1.000	100

Sendo realizados os controles nos resíduos que iniciam o processo de compostagem, o composto maturado deve se enquadrar nos limites da Proposta de Norma. De qualquer forma, a dosagem no produto final deve ser periodicamente feita como sugerido em 6.1 pois como há perda considerável de matéria orgânica durante a compostagem, haverá uma concentração no teor de metais pesados.

A experiência dos autores com lodos do Estado do Paraná, mesmo os da região de Curitiba, onde a concentração de industrias é maior, mostra que o teor de metais pesados nos lodos de esgoto é muito baixa em relação aos limites fixados pela norma. Já as caracterizações feitas na cidade de São Paulo (Santos, 1997) mostram teor de metais pesados bem superiores aos observados no Paraná, certamente como resultado da maior contaminação industrial.

O monitoramento dos metais pesados deve ser parte do controle de qualidade dos lodos e do composto final, porém, com exceção dos esgotos muito contaminados por efluentes industriais, dificilmente será um fator limitante para a compostagem e uso agrícola do composto obtido.

Capítulo 7 - POSSIBILIDADES DE USO DO COMPOSTO

Um composto bem maturado é rico em colóides húmicos, que tem ação nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

A parte sólida do solo se organiza em “agregados”, responsáveis pela estrutura do solo, característica física que influencia a facilidade de penetração das raízes, a percolação e armazenagem de água pelo solo, sua resistência à erosão e sua porosidade.

A formação destes agregados depende de elementos de ligação, que funcionam como uma espécie de “cola” na sua estruturação. Estes elementos de ligação são os colóides, que podem ser minerais (argilas) ou orgânicos (húmus). Os colóides além de estruturar o solo, também se constituem na parte quimicamente ativa do sistema, armazenando os nutrientes mais solúveis, que são os alimentos das plantas. A capacidade do solo em armazenar cátions é conhecida como CTC (Capacidade de Troca Catiônica).

Estudos realizados pelo IAPAR (Instituto Agrônomo do Paraná) mostraram que para os solos da região de Londrina, mais de 80% da CTC do solo era devida à presença de húmus, já que as argilas dos solos de clima quente são muito intemperizadas e possuem pouca CTC. Estes dados mostram a importância do húmus estável para a fertilidade do solo e seu consequente potencial de produção agrícola.

Mas o húmus estável do solo está constantemente se mineralizando, ou seja, a cada ano o solo perde parte de seu estoque de húmus. A correta gestão do estoque de húmus de um solo é um dos objetivos da boa prática agrícola. O estoque de húmus do solo pode ser repostado. Estudos em países de clima temperado mostraram que cerca de 4% dos restos de culturas deixadas no solo se transformam em húmus estável, sendo o resto simplesmente mineralizado. Em países quentes e chuvosos, como o Brasil, esta taxa de conversão deve ser ainda menor.

A taxa de transformação de matéria fresca em húmus salta para 20-40% quando os resíduos passam pelo processo de compostagem.

Estas reflexões são necessárias porque além de ser um processo de tratamento de resíduos, a compostagem é uma “fábrica” de húmus estável para o solo.

Portanto, quando se discute uso do composto, é preciso evitar o erro simplório de fixar seu valor apenas no seu teor de nutrientes. Evidentemente, os nutrientes, principalmente o nitrogênio e fósforo, estão bem representados no composto produzido a partir de lodo e tem valor econômico importante, porém, o valor agrônomo do composto vai além dos nutrientes minerais.

Alguns pesquisadores da área agrônoma dizem que ao se colocar adubo químico no solo, alimenta-se as plantas. Ao se colocar composto, alimenta-se o solo, melhorando suas propriedades globais e consequentemente seu potencial de produção.

Do ponto de vista científico, principalmente em climas tropicais e subtropicais, há muita carência de conhecimento a respeito da dinâmica e importância da matéria orgânica no solo. Em função deste fato, é difícil classificar o composto e estabelecer seu valor em húmus. Porém, já existem dados suficientes para que a comparação do composto com o fertilizante mineral não seja limitada às produções de culturas de ciclo curto.

O composto é um condicionador de solo, que atua benéficamente nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas, além de fornecer nutrientes. Sua ação é diferente dos fertilizantes minerais.

Também deve ser observado que não deve existir qualquer tipo de antagonismo entre o uso do composto e o dos fertilizantes minerais. O composto não deve ser visto como um substituto do fertilizante mineral, mas sim como um produto que deve ser usado em harmonia com o fertilizante mineral.

Tradicionalmente, a horticultura e a agricultura têm sido os maiores consumidores de composto. Recentemente, o composto também tem sido usado como meio para biofiltração, supressão de alguns fitopatógenos, e até como meio filtrante para o tratamento de águas pluviais, captadas pelos sistemas de drenagem urbana.

Embora estas aplicações sejam promissoras, neste breve capítulo serão comentadas as aplicações mais correntes do composto, apenas como subsídio para o trabalho de levantamento de mercado para potenciais clientes:

- Olericultura : produção de legumes e hortaliças.
- Agricultura intensiva : produção de milho, trigo, etc.
- Viveiros de plantas : produção de mudas de essências florestais e árvores frutíferas.
- Jardinagem: preparação do solo para implantação de plantas ornamentais ou gramados.
- Fruticultura : adubação em covas, na ocasião do plantio ou em árvores já implantadas
- Campos de golfe ou futebol: na implantação do gramado ou cobertura.
- Parques públicos e praças.
- Companhias de fertilizante mineral : uso como “carga”.
- Recuperação de áreas degradadas.
- Recomposição da camada fértil na cobertura de aterros sanitários.
- Silvicultura.

Para grandes culturas, em experimento realizado no âmbito do PROSAB, Bloch (1999) testou na região de Londrina vários compostos produzidos com lodo e resíduos de podas de árvores em doses de 20, 40 e 100 t/ha, em base seca, para a cultura do milho.

A dose de 20 t/ha apresentou massa verde duas vezes superior à produção do solo testemunha, que não recebeu o composto. A produtividade foi crescente para 40 e 100

t/ha , podendo-se observar que mesmo em condições de superdosagem (100 t/ha) , não foi detectado nenhum efeito tóxico.

Na bibliografia internacional, uma dose de 30 a 40 t/ha em base seca é considerada boa para o composto de lodo. Observa-se que as doses mais elevadas (100 a 200 t/ha) de aplicação do composto são nas atividades de jardinagem e produções florais.

Na produção de mudas, o composto é misturado com solo ou vermiculita , sendo que em muitos casos é utilizado puro.

Capítulo 8 - ASPECTOS LEGAIS, INSTITUCIONAIS E MERCADOLÓGICOS

A escolha da compostagem como solução para o tratamento do lodo de esgoto não pode ser vista apenas do ponto de vista técnico. Trata-se de uma solução privilegiada para o processamento integrado de vários resíduos urbanos e agroindustriais. Consequentemente devem ser estabelecidas parcerias interinstitucionais, que além de poderem representar um parceiro para dividir os custos de investimento, também podem ser os potenciais consumidores do composto produzido.

Do ponto de vista legal, o composto deve apresentar qualidade coerente com os critérios fixados por Norma ou estar de acordo com os parâmetros fixados pelo Órgão Ambiental do Estado ou Secretaria de Agricultura.

Mesmo sem uma Norma específica para a uso do composto de lodo de esgoto, o produtor de composto pode se orientar pelos critérios sugeridos neste trabalho. Ainda assim, devido à falta de uma norma oficial, é recomendável que o composto produzido com lodo de esgoto não seja utilizado em horticultura, aplicação considerada de maior risco por permitir contato direto entre as plantas que serão consumidas cruas e o composto.

Finalmente, de nada adianta produzir um composto, com excelentes qualidades agrônômicas e sanitárias se não houver consumidores. Isto pressupõe uma estratégia de marketing e difusão tecnológica para os clientes potenciais. Todos estes pontos estão interligados e devem ser considerados durante a fase de projeto da usina.

8.1 - Responsabilidade da empresa de saneamento

A legislação brasileira e internacional é clara quando diz que o produtor de um resíduo é responsável pelo seu tratamento e destino final. Portanto, a empresa de saneamento, produtora do lodo, é integralmente responsável pelo resíduo que ela gera.

O lodo é um resíduo produzido por uma atividade industrial (tratamento de esgoto), que pode eventualmente ser tratado e se transformar em um insumo agrícola caso se enquadre dentro de critérios pré-estabelecidos, que garantam a segurança sanitária e ambiental para seu uso.

Mesmo que a empresa de saneamento terceirize o tratamento do lodo ou simplesmente doe o lodo para uma empresa processar e utilizar o resíduo, ainda assim, ela é responsável pelo uso do produto, devendo manter controle sobre os procedimentos de tratamento, registrar dados analíticos e fixar padrões operacionais para que a reciclagem do lodo aconteça de forma segura e controlada, não ficando ao sabor do improvisado.

Não faz parte do escopo desta publicação o estudo dos modelos e mecanismos de gestão do lodo, porém é necessário observar que a compostagem é uma alternativa de

tratamento do lodo que deve integrar um programa maior, sujeito a estratégias, controles e verificações da companhia de saneamento.

Isto explica a ênfase dada neste trabalho aos critérios normativos e parâmetros de controle do processo e do produto final, mesmo considerando que a legislação brasileira ainda não está totalmente definida sobre este assunto.

8.2 - Necessidades de ações interinstitucionais

A compostagem é uma tecnologia privilegiada para o tratamento integrado de vários tipos de resíduos.

Para compostar o lodo, haverá necessidade de um resíduo estruturante que pode ser produzido pelo Município, por uma cooperativa agrícola ou por indústrias, o que abre possibilidades de parcerias, não só para dividir os custos de implantação de uma usina de compostagem, mas também para ligar a atividade de produção do composto ao seu potencial consumidor.

Os Municípios além de produzir resíduos de podas de árvores e capinas, também tem necessidade de substratos orgânicos para produção de mudas, de adubos orgânicos para praças e jardins, etc.

Da mesma forma, uma cooperativa agrícola pode fornecer resíduos estruturantes e distribuir o composto a seus cooperados.

É interessante que as possibilidades de parcerias sejam estudadas e formalizadas na fase de projeto da usina de compostagem.

8.3- Licenciamento ambiental e Estudos de Impacto Ambiental

Do ponto de vista legal, a instalação de uma usina de compostagem e a reciclagem agrícola do lodo de esgoto estará sujeita aos procedimentos de licenciamento ambiental.

As normas e procedimentos variam de acordo com os Estados, portanto não serão definidos aqui os procedimentos para esta finalidade. É recomendável no entanto, que mesmo para as pequenas estações, o Órgão Estadual de Meio Ambiente seja chamado a participar do processo, desde a fase de escolha de área para implantação da usina.

Para os grandes sistemas, pode haver necessidade de um Estudo de Impacto Ambiental.

8.4 - Normas a serem observadas.

Nota-se o esforço de vários Estados da Federação em pesquisar e propor contribuições para a normatização da reciclagem agrícola do lodo no Brasil.

O estado do Paraná elaborou uma proposta de Norma Técnica simples de ser usada, segura e adaptada às necessidades ambientais e sociais do país. Em função destas características ela foi tomada como referência neste trabalho ainda que provisoriamente.

Há também alguns Decretos e Portarias na legislação brasileira sobre o produto final da compostagem.

O Decreto n. 86.955 , de 19 de janeiro de 1982, define em seu artigo terceiro:

1- Fertilizante - substância mineral ou orgânica , natural ou sintética , fornecedora de um ou mais nutrientes para a planta.

e) Fertilizante composto - Fertilizante obtido por processo bioquímico, natural ou controlado com mistura de resíduos de origem vegetal ou animal.

A Portaria n.1 de 4 de março de 1983 dá especificações , garantias e tolerância para os fertilizantes orgânicos:

7- Fertilizantes orgânicos - Os fertilizantes orgânicos terão as seguintes especificações e garantias:

7.2 - Organo minerais e “composto “ deverão apresentar garantias , no mínimo , de acordo com as constantes na Tabela n. 3.

Tabela n.3. da Portaria n.1 de 04/03/83.

Garantia	Organomineral	Composto
Matéria orgânica total	mínimo de 25%	mínimo de 40%
Nitrogênio total	Conforme registrado	mínimo de 1,0%
Umidade	máximo de 20%	máximo de 40%
Relação C/N	-----	máximo de 18/1
Índice pH	-----	Mínimo de 6,0
P ₂ O ₅ e K ₂ O	Conforme registrado	-----
Soma NPK, NP, PK ou NK	mínimo de 12%	-----

10. Tolerâncias - Aos resultados analíticos obtidos serão admitidas tolerâncias em relação às garantias do produto, observados os seguintes limites:

10.9- Fertilizantes orgânicos:

10.9.1- Nitrogênio (N) total, pentóxido de fósforo (P₂O₅) e óxido de potássio (K₂O)- Até 10% (dez por cento para menos , isoladamente)

10.9.4- Matéria orgânica - Até 10% (dez por cento) para mais.

10.9.5 - Umidade - Até 10% (dez por cento) para menos.

10.9.6- pH - Até 10% (dez por cento) para menos.

10.9.7- Relação C/N . Até 3,0 (três) unidades para mais.

A Portaria n. 31 de 8 de junho de 1982, fixa os métodos analíticos que passam a constituir métodos padrões oficiais para análise de fertilizantes.

Os métodos para análises químicas são do Laboratório Nacional de Referência Vegetal do Ministério da Agricultura.

A Portaria n. 505, de 16 de outubro de 1998, define normas disciplinadoras para a produção , tipificação, processamento, envase, distribuição, identificação e certificação da qualidade de produtos orgânicos, sejam de origem animal ou vegetal.

No tocante aos produtos utilizados para a manutenção da fertilidade do solo, a Portaria prescreve:

2.3.1- Tanto a fertilidade como a atividade biológica do solo e das águas deverão ser mantidas e incrementadas mediante , entre outras, as seguinte condutas:

g- Sustentabilidade e incremento da matéria orgânica do solo

h- Manejo da matéria orgânica.

Não há uma discriminação sobre os adubos orgânicos passíveis de serem usados na agricultura biológica. Certamente serão as Entidades Certificadoras que decidirão se um composto obtido com lodo de esgoto é aceitável para esta modalidade de agricultura.

8.5 - Aspectos mercadológicos

O estudo mais aprofundado do potencial do mercado e perfil do produto demandado deve ser realizado na fase de projeto , como exposto no Capítulo 5 , pois a definição do tipo de produto que o mercado demanda pode ter reflexos na concepção e equipamentos da usina.

O produto gerado no ensaio piloto pode ser mostrado aos potenciais clientes, estimando-se as quantidades demandadas e a expectativa de preços.

O preço de venda do composto é obviamente um item importante para a viabilidade econômica do projeto. Mesmo levando-se em conta que o objetivo principal é tratar e dispor adequadamente um resíduo, o preço de venda do composto pode suprir em parte ou totalmente os custos de operação da usina.

Não há parâmetros a serem fixados previamente. Nos países desenvolvidos o preço de venda do composto de lodo varia de acordo com a qualidade do composto e com as

necessidades locais. Vale a lei do mercado, e neste sentido é preciso ter um estratégia de marketing que explique aos consumidores:

- Os benefícios agronômicos do uso do composto
- A segurança sanitária do produto.
- A vantagem financeira que o agricultor pode ter.
- A melhor tecnologia de utilização.

Sobre o último item, é fundamental que a usina conte com um engenheiro agrônomo que possa dar apoio técnico aos agricultores. Para os pequenos sistemas, um convênio com órgãos Estaduais ou Federais de extensão rural pode ser interessante, tanto para introduzir o produto no mercado como para orientar seu uso e necessidades de complementação com fertilizantes minerais.

No desenvolvimento de um programa para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto na região de Curitiba, realizado pela SANEPAR, observou-se que a difusão tecnológica através de dias de campo foi de grande eficiência na divulgação do produto. Os eventos foram organizados pela EMATER-PR, que escolhia uma área de demonstração, aplicava o lodo em várias doses e quando a cultura estava em fase de colheita, era realizado o dia de campo, ocasião em que os agricultores acompanhavam a colheita, viam os resultados práticos do uso do lodo no solo, eram informados sobre as garantias e qualidades do produto, etc.

O composto pode ter consumidores de outro perfil: produtores de mudas, empresas de jardinagem, agricultores ou cooperativas. Neste caso também é possível a realização de eventos práticos, onde os consumidores possam ter contato direto com as possibilidades de uso do produto.

Referências Bibliográficas

- AGENCE NATIONALE POUR LA RÉCUPÉRATION ET L'ÉLIMINATION DES DÉCHETS – ANRED. – La valorisation agricole des boues de stations d'épuration urbaines. Paris, 117 p, 1988.
- BARROS, R. T. et al – Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para Municípios – vol.2 – Saneamento. Belo Horizonte. Escola de Engenharia da UFMG, 1995, 221 p.
- BONNIN, C. Travaux du CEN/TC 308: Présentation des guides de bonne pratique pour la production et l'utilisation des boues. Paris, 36 p, 1996
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. Manual Técnico para Utilização Agrícola do lodo de Esgoto do Paraná, Sanepar, 1997, 96 p.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. Proposta de Norma Técnica para Reciclagem Agrícola do Lodo de Esgoto, 32 p., 1997.
- CONNERY, J. Seminar publication:composting of municipal wastewater sludges - Seminar publication, EPA/ 625/4-85/014, Cincinnati, Ohio, 67p., 1985
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. Environmental Regulations and Technology Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge . Under 40 CFR Part 503. S.1: EPA, 1992 (EPA 625/R – 92/013)
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY- EPA . Operations manual sludge handling and conditioning . EPA-600/ 8-85/026, Washington, D.C., 1978.
- EPSTEIN, E. The Science of composting. Technomic Publishing Co, Lancaster, USA, 487 p.,1998.
- FERNANDES, F. ; ANDREOLI C.V. ; DOMASZAK, S.C. Caracterização preliminar dos principais tipos de lodo de esgoto do Paraná para um programa de reciclagem agrícola. SANARE, Curitiba, v.6, n.6, p. 15-21, 1996.
- FERNANDES, F. ;PIERRO , A . C. ; YAMAMOTO R.Y. Produção de fertilizante orgânico por compostagem do lodo gerado por estações de tratamento de esgotos. Pesq. Agropec. bras., Brasília, v.28, n.5, p. 567-574,1993
- FERNANDES, F. et al. Aperfeiçoamento de Tecnologia de Compostagem e Controle de patógenos. SANARE, Curitiba – Sanepar, v.5, n.5, p 36-45, 1996.
- FERNANDES, F.; VIEL, M. ; SAYAG, D.; ANDRÉ,L. Microbial break down of fats through in-vessel co-composting of agricultural and urban wastes. Biological wastes , n.26, p.33-48, 1988.
- HAY, J.C. Desinfection of sewage sludge by windrow composting. In "Desinfection of wastewater effluents and sludges conference" University of Miami, Miami, Florida, 1984
- INSTITUTE FOR SOLID WASTES OF AMERICAN PUBLICS WORKS ASSOCIATION. Municipal refuse disposal public administration service. 3ª ed. Illinois, p. 293-329, 1970.

- KIEHL, E. J. Manual de Compostagem: maturação e qualidade do composto. Editado pelo autor. Piracicaba, 1998.
- KUTER, G. A . (coordenador). Biosolids composting . Water Environmental Federation, Alexandria, VA, 187 p., 1995.
- LUDUVICE, M. L. Uso e disposição final de lodos orgânicos. In “ Anais do Seminário Internacional de Tratamento e Disposição de Esgotos Sanitário: tecnologia e perspectivas para o futuro”. Brasília, Caesb, p. 85-96, 1996.
- MILLER, F.C. FINSTEIN, M.S.; Equipment for control and monitoring of high rate composting . In " Biological reclamation and land utilization of urban wates " Simpósio Internacional " Napolis, 11-14 outubro , 1983.
- MIYASAWA, M. et al. Dados ainda não publicados.
- SANTOS, H. F. & TSUTIYA, M. T. Aproveitamento e disposição final do lodo de estação de tratamento do Estado de São Paulo. ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, v.2, n.2, p. 70-81, 1997.
- SILVA ,S. M .C . P.& FERNANDES, F. Co-compostagem de biossólidos , lodo de tratamento de água e resíduos de podas de árvores. In " XXVI Congresso Interamericano de Ingenieria sanitaria y ambiental", 1-5 de novembro de 1998, Lima , Perú, Anais...pg 51, 1998.-
- SOCCOL, V. T. et al . Eficácia dos diferentes processos de tratamento do lodo na redução de viabilidade de ovos de Helminthos. SANARE, Curitiba – Sanepar, v.8, n.8, p. 24-32, 1997.
- STRAUCH, D. Occurrence of microorganisms pathogenic for man and animal in source separeted biowaste and compost – importance, control, limits, epidemiology. In “ Science of composting”. 1420 p, 1997.
- VAN HAANDEL, C. A. & LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgotos – um manual para regiões de clima quente. Campina Grande, 1994.