

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TÉCNICAS EXPERIMENTAIS PARA
DETERMINAÇÃO DA FRAÇÃO ORGÂNICA NA COMPOSTAGEM DE
RESÍDUOS SÓLIDOS



ANDRÉ LUÍS DE OLIVA CAMPOS

DEDALUS - Acervo - EESC



31100013528

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Eduardo Blundi

São Carlos
1998

Class.	TESE
Curt.	1074
Tombo	0252198

31100013528

st 0999122

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP**

C198a Campos, André Luís de Oliva
Avaliação de diferentes técnicas experimentais
para determinação da fração orgânica na
compostagem de resíduos sólidos / André Luís de
Oliva Campos. -- São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Blundi.

1. Resíduos sólidos. 2. Matéria orgânica.
3. Compostagem. 4. Metodologia. I. Título.

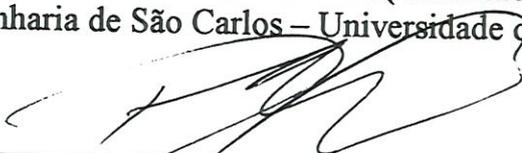
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ANDRÉ LUÍS DE OLIVA CAMPOS**

Dissertação defendida e aprovada em 25.09.1998
pela Comissão Julgadora:



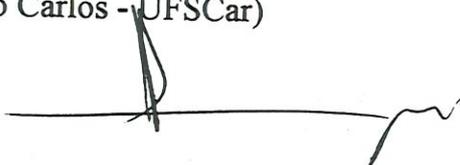
Prof. Dr. **CARLOS EDUARDO BLUNDI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo)



Prof. Dr. **DURVAL ROBRIGUES DE PAULA JUNIOR**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)



Prof. Dr. **BERNARDO ARANTES DO NASCIMENTO TEIXEIRA**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
Coordenador da Área de Hidráulica e Saneamento



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Aos meus pais, obrigado por tudo!

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Blundi, pela orientação e apoio na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. João Sampaio D'Ávila, por me proporcionar o gosto pela pesquisa.

Ao Prof. Dr. Durval de Paula Jr. Pelas sugestões durante o decorrer do trabalho.

Aos meus familiares e amigos, que me incentivaram e sentiram saudades.

Ao Prof. Dr. Mário Sérgio Rodrigues, pelos conselhos e pelo material fornecido.

A Luciana Coêlho Mendonça, pela ajuda, carinho e compreensão.

Aos amigos Adelino, Ricardo, Cláudia, Luciane, Kelly, Suzy, Celso, Herlane, Sissy, Laís, Luci, Paulo Tadeu, Leila, Marilu, Artur e Lilia, pelo apoio, pelos papos e pela companhia.

A Neyson Martins Mendonça, pelo companheirismo.

Aos colegas Paulo, Júlio, Cidinha e Eliane, do laboratório de Saneamento, que me ajudaram nas pesquisas.

Ao pessoal do Departamento, Sá e Pavi, que sempre estavam prontas para resolver qualquer problema.

À CONSTRUFERT, que forneceu o material e local para estudo de campo, Cláudio Padiar, Roberto e Gisela.

Ao Prof. Dr. Masetto e a Valéria, pelo apoio nas análises.

A todos que passaram pelo meu caminho, pois sempre trazem algo de bom.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 Conceituação	6
3.2 Classificação dos Resíduos Sólidos	7
3.3 Gerenciamento de resíduos sólidos	9
3.4 Características do lixo e problemática do tratamento e destino final	11
3.5 Compostagem	17
3.5.1 Classificação dos Métodos de Compostagem	20
3.5.2 Fatores que Influenciam na Compostagem	24
3.6 Características do Composto Orgânico	27
3.7 Monitoramento da Estabilização da Matéria Orgânica	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1 Introdução	32
4.2 Características do lixo estudado	32
4.3 Construção da leira de estudo	35
4.4 Monitoramento da leira	39
4.5 Coleta de amostras	40
4.6 Preparo das amostras para análise	41
4.7 Determinações de parâmetros convencionais	43
4.7.1 Umidade	43

4.7.2 pH	45
4.8 Análises e determinações da amostra original	45
4.8.1 Demanda Química de Oxigênio	45
4.8.2 Matéria Volátil	47
4.8.3 Carbono Total	47
4.8.4 Carbono Total* e Carbono Orgânico Total (COT)	48
4.8.5 Demanda Química de Oxigênio teórica	48
4.8.6 Nitrogênio Total Kjeldahl	49
4.9 Análises da amostra de colóides	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1 Monitoramento da Leira de Compostagem	55
5.1.1 Temperatura	57
5.1.2 Umidade	58
5.1.3 pH	59
5.2 Monitoramento da leira por outros parâmetros	62
5.2.1 DQO e DQO _T	64
5.2.2 Carbono Total	66
5.2.3 Nitrogênio	67
5.2.4 Relação C/N	69
5.3 Monitoramento da leira através das análises dos colóides	72
5.3.1 DQO e DQO _T	74
5.3.2 Carbono total	77
5.3.3 Nitrogênio	77
5.3.4 Relação C/N	79
5.4 Correlações	80
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	84
7. BIBLIOGRAFIA	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Operações efetuadas na área de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.	16
Figura 3.2 - Curva padrão de temperatura durante a compostagem.	29
Figura 3.3 - Tendências de aumento ou redução de diversos parâmetros, conforme o tempo de compostagem.	30
Figura 4.1 - Fluxograma do sistema de Compostagem da Usina de Lixo de Araraquara.	33
Figura 4.2 - Etapas operacionais de segregação do lixo urbano da Usina de lixo de Araraquara.	34
Figura 4.3 - Área cimentada para colocação da leira.	36
Figura 4.4 - Colocação do lixo para caracterização e montagem da leira.	36
Figura 4.5 - Leira após montagem.	38
Figura 4.6 - Pontos de tomada de amostras em uma leira (vista superior).	41
Figura 4.7 - Fluxograma das etapas do monitoramento.	44
Figura 5.1 - Evolução da temperatura na leira.	57
Figura 5.2 - Evolução da Umidade total na leira.	58
Figura 5.3 - Evolução do pH na compostagem.	60
Figura 5.4 - Aspecto da leira no início e no final da compostagem.	62
Figura 5.5 - Evolução da DQO na compostagem.	64
Figura 5.6 - Evolução da DQO e QDO_T na compostagem.	64
Figura 5.7 - Evolução do C e C^* durante a compostagem.	66
Figura 5.8 - Evolução do Nitrogênio durante a compostagem.	67
Figura 5.9 - Evolução de C e N durante a compostagem.	69
Figura 5.10 - Evolução da relação C/N na compostagem.	69
Figura 5.11 - Evolução do teor de colóides.	73
Figura 5.12 - Ilustração do decréscimo da Matéria volátil e do acréscimo do teor de colóides ao longo do tempo.	73
Figura 5.13 - Evolução da DQO e DQO_{Tc} no extrato.	76
Figura 5.14 - Evolução de C e C^* no extrato.	77
Figura 5.15 - Evolução do Nitrogênio no extrato.	78
Figura 5.16 - Evolução do Carbono e do Nitrogênio no extrato.	78
Figura 5.17 - Evolução da relação C/N no extrato.	79

Figura 5.18 - Correlação entre métodos de determinação de Carbono na amostra original e Colóides.	81
Figura 5.19 - Correlações entre Carbono Orgânico e DQO para amostra original e colóides.	82
Figura 5.20 - Correlações entre Matéria Volátil e DQO para amostra original e colóides.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Composição do material utilizado (lixo após as etapas operacionais de segregação).	37
Tabela 5.1 - Valores encontrados durante o monitoramento do processo de compostagem.	56
Tabela 5.2 - Problemas durante o monitoramento da leira.	61
Tabela 5.3 - Parâmetros da amostra original analisados.	63
Tabela 5.4- Parâmetros analisados da amostra dos colóides.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	- Concentração do parâmetro na solução digerida (mg/l)
B	- Volume final da solução digerida (l)
C	- Carbono Total (análise em mufla)
C*	- Carbono Total (análise em TOC)
CI	- Carbono inorgânico (mg/g)
COT	- Carbono Orgânico Total (análise em TOC)
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
DQO _T	- Demanda Química de Oxigênio (Teórica)
ETE	- Estação de tratamento de Efluentes
g(e)	- Peso de colóides na amostra dissolvida por g de extrato (g)
g _{amostra}	- Peso da amostra seca utilizada na digestão para análise de DQO(g)
MV	- Matéria Volátil
N	- Nitrogênio
NTK	- Nitrogênio Total Kjeldahl
P ₁	- Peso da amostra após estufa (g)
P ₂	- Peso da amostra após calcinação (g)
P _C	- Peso de colóides na amostra (g)
P _F	- Peso final da amostra após análises(g)
P _I	- Peso inicial da amostra (g)
U ₁	- Teor de umidade a 50°C (%)
U ₂	- Teor de umidade a 105°C (%)
U _T	- Teor de umidade total (%)

RESUMO

CAMPOS, A.L.O. (1998). *Avaliação de Diferentes Técnicas Experimentais para Determinação da Fração Orgânica na Compostagem de Resíduos Sólidos*. São Carlos, 91pp. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Atualmente tem sido muito empregada a técnica de compostagem para a degradação da fração orgânica de resíduos de origem domiciliar. Normalmente as leiras de compostagem são monitoradas através de parâmetros como temperatura, pH e umidade. Tais determinações podem não conduzir a resultados que possam expressar significativamente o comportamento real do processo. Justamente analisando a questão nesse aspecto, é que se procurou estudar a aplicação de uma metodologia mais específica, através do monitoramento de uma leira de compostagem, de tal forma que se pudesse acompanhar a degradação dos compostos orgânicos. Utilizou-se, para atingir tal meta, métodos usuais de determinação de matéria orgânica para resíduos líquidos, com adaptações necessárias para o emprego em resíduos sólidos. Obtiveram-se dados que podem ser utilizados no monitoramento da compostagem, porém parece não existir correlações significativas entre os resultados dos métodos utilizados. Também era importante a verificação da humificação da leira e, por tal motivo, procurou-se utilizar uma metodologia que atendesse a esse requisito. Dessa forma, empregou-se uma metodologia para determinação dos colóides, que são os constituintes básicos do composto orgânico estabilizado, e os resultados informaram que a homogeneidade da amostra é um fator bastante importante para as análises realizadas.

Palavras-chave: Resíduos sólidos; Matéria orgânica; Metodologia; Compostagem

ABSTRACT

CAMPOS, A.L.O. (1998). *Evaluation of Different Experimental Techniques to Determinate the Organic Fraction in a Solid Waste Composting*. São Carlos, 91p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Presently, the composting technique is being widely utilized for the degradation of the organic fraction of domestic solid wastes. Usually the composting windrows are monitored by parameters, such as temperature, pH and moisture. Such determinations may not lead to results that express meaningfully the behavior of real process. With the purpose of analysing this aspect, the study of application of specific methodology was conducted by monitoring a composting windrow to observe the evolution of the degradation of the organic composts. Usual methods of determination of organic matter for wastewater were utilized, adapting them for solid waste. The data obtained can be utilized in the monitoring the composting process, but it seems that there do not exist significant correlations between the results of the methods employed. It was also important to verify the humification of the windrow for which an adequate methodology was used. Thus this study employed a methodology for colloid determination which are the basic constituents of the stabilized organic compost. The results obtained showed that the sample homogeneity is a very important factor for the type of analysis conducted here.

Keywords: Solid wastes; Organic matter; Methodology; Composting

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a disposição final de lixo tornou-se um sério problema a ser enfrentado por todos os países, decorrente não só da escassez de terrenos disponíveis para aterros sanitários, como também pelo aumento substancial dos níveis per capita de resíduos sólidos gerados. Esta modificação na quantidade e qualidade do lixo foi conseqüência, principalmente, do processo de industrialização vivenciado na maioria das economias mundiais, o que gerou significativas alterações nos padrões de consumo dessas sociedades.

Tais modificações, tanto de quantidade como de composição de resíduos sólidos, são caracterizadas por aumentos substanciais das parcelas de materiais não degradáveis em relação às de lixo orgânico. Principalmente em países do Terceiro Mundo, deve-se destacar o agravamento dos custos externos gerados pela insuficiência de recursos disponíveis para o financiamento de um sistema integrado de gerenciamento do lixo. Aterros com deficiente controle sanitário e/ou clandestinos e inexistência de coletas regulares constituem-se em graves problemas para a maioria destes países (PEARCE e TURNER* apud IPEA, 1996).

A opção por priorizar reduções globais dos níveis de lixo requer permanente busca de alternativas tecnológicas, para que sejam aperfeiçoadas as técnicas mais adequadas ao tratamento de resíduos

* PEARCE, D., TURNER, R.K. (1994). *Economics and solid waste management in the developing world*. London, (Cserge Working Paper, WM 94-05).

sólidos, conduzindo, portanto, a uma elevação do grau de recuperação de materiais e sua reintrodução no processo produtivo (reciclagem).

Segundo VASCONCELOS(1998), em reportagem sobre o relatório do Banco Mundial, o Brasil produz 100.000 toneladas de lixo por dia, dos quais 40% não são recolhidos e apenas 28% são acondicionados e tratados adequadamente, deixando a população exposta a diversas doenças. Já PEREIRA NETO(1996a) cita que geralmente somente as maiores cidades têm um sistema regular de coleta seguida por um aterro não controlado ou plantas de compostagem mal gerenciadas.

A disposição a céu aberto, bem como o uso de aterros, tem acarretado sérios problemas para o meio ambiente e a saúde pública com considerável impacto nas comunidades pobres em volta das grandes cidades. Visto isso, tem-se a necessidade de programas para melhorar o tratamento e a disposição final do resíduo. SCHALCH (1995) cita que são poucos os centros de pesquisa que iniciaram estudos nessa área de forma consciente. Para isso é preciso dar mais ênfase a uma política ambiental satisfatória que consista em garantir um ambiente que assegure as boas condições de vida.

O presente trabalho preocupa-se em dar uma contribuição para o estudo dos resíduos sólidos, relacionando métodos de baixo custo para análise de um processo de compostagem, tendo em vista que a compostagem é um processo de tratamento de resíduo que diminui a quantidade de lixo que vai para os aterros ou lixões, além de promover a formação de um produto com características de condicionador de solos. Além disso procurou-se métodos que demandassem menos tempo para execução visando, com isso, uma maior agilidade nas análises, facilitando o processo de monitoramento.

Compostagem, segundo KIEHL (1985), é um processo biológico de transformação da matéria orgânica crua em substâncias húmicas, estabilizadas (composto), com propriedades e características completamente diferentes do material que lhe deu origem. O composto, acima de tudo, é um condicionador de solos, classificado pelo fato de sua matéria orgânica humificada estar em maior proporção e que corresponde a cerca de 40 a 70%.

MASIANI e DOMEIZEL(1996) citam que embora vários testes tenham sido desenvolvidos para monitoramento da matéria orgânica, os parâmetros que são geralmente utilizados para o monitoramento são a umidade, oxigênio, temperatura e pH. A bioestabilização e a humificação devem ser confirmadas por outras informações, tais como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Umidade, Nitrogênio, relação Carbono/Nitrogênio, etc.. Alguns autores, como JIMENEZ e GARCIA (1991), BARBERIS e NAPPI (1996), utilizam ainda de mais alguns parâmetros para acompanhamento da compostagem, como Capacidade de Troca de Cátions, Condutividade elétrica, etc.

O que se vê na prática é o acompanhamento da compostagem apenas pela análise da temperatura e/ou teor de carbono visto que são parâmetros que são relativamente fáceis de se determinar na fração sólida do resíduo. HAUG (1991) cita que existe um grande número de fatores que têm limitado a aplicação de testes de laboratório em substratos de compostagem, porque os testes padrões de DBO e DQO são feitos para amostras líquidas de pequeno volume e não são bem ajustadas para resíduos sólidos ou semi sólidos e também porque os equipamentos de laboratório, mais adequados para grandes volumes e substratos sólidos, são caros e não comumente disponíveis em laboratórios de Saneamento.

Justamente analisando a questão nesse aspecto, é que se procurou estudar o monitoramento de uma leira de compostagem através da aplicação de uma metodologia mais específica, de tal forma que se pudesse acompanhar a mineralização dos compostos orgânicos, por um lado, e sua respectiva bioestabilização, por outro. Utilizou-se para atingir tais metas, métodos usuais de determinação de matéria orgânica para resíduos líquidos, com adaptações necessárias para o emprego em resíduos sólidos. Neste aspecto a preocupação estava voltada à avaliação de matéria orgânica e sua respectiva variação em função do tempo. Também era importante a verificação da bioestabilização da leira e, por tal motivo, procurou-se utilizar uma metodologia que atendesse a esse requisito. Dessa forma, empregou-se uma metodologia para a determinação de colóides que são os constituintes básicos do composto orgânico estabilizado. Com relação a metodologia para a determinação de matéria orgânica mencionada, utilizou-se de medidas de DQO (Demanda Química de Oxigênio), COT (Carbono Orgânico Total) e MV (Matéria Volátil).

Visto o exposto, o presente trabalho visa analisar metodologias para o monitoramento da compostagem através da fração sólida do composto, testando e adaptando metodologias novas e testando metodologias já conhecidas, fazendo as correlações, sempre procurando metodologias simples e de baixo custo.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é o desenvolvimento de metodologia aplicada para a determinação da fração orgânica em uma compostagem de resíduos sólidos, tais como a Demanda Química de Oxigênio (DQO), Matéria Orgânica Volátil (MV), Carbono total (C), Carbono Orgânico Total (COT), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), comparando os resultados obtidos pelos vários métodos desenvolvidos e estabelecendo correlações, visando, com isso, acompanhar o monitoramento da estabilização da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares através da metodologia desenvolvida e de outros parâmetros como pH, umidade e temperatura.

Outro objetivo é o de avaliar metodologia de separação da matéria orgânica humificada (colóides) em relação a matéria orgânica total e verificar seu comportamento através das mesmas análises citadas anteriormente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir procurou-se fazer uma revisão do tema resíduos sólidos enfocando sua conceituação, o gerenciamento dos resíduos e o processo de compostagem.

3.1 Conceituação

Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 1987), “resíduos sólidos são os resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, comercial, agrícola e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível.”

SCHALCH (1995), LIMA (1995), PINTO (1979) e JARDIM et al.(1995) citam uma definição mais específica para os resíduos sólidos urbanos - lixo, como sendo todo o material resultante da atividade humana. Estes resíduos, segundo PINTO (1979), podem ser objetos que não mais possuem valor ou utilidade, porções de materiais sem significação econômica, sobras de processamentos industriais ou domésticos a serem descartadas, enfim, qualquer coisa que se deseje botar fora.

Com respeito a essa definição, deve-se observar que o conceito de utilidade é relativo; objetos e materiais que são descartados por determinadas pessoas podem ser reaproveitados por outras. Do mesmo modo, materiais que em pequenas quantidades não têm valor, quando em grandes quantidades, como os existentes no lixo dos grandes centros urbanos, podem passar a ter significado econômico considerável.

Da definição apresentada, desprende-se que o lixo tem composição extremamente variada, dependendo basicamente da natureza de sua fonte produtora (PINTO 1979).

3.2 Classificação dos Resíduos Sólidos

De acordo com SCHALCH (1995), os resíduos sólidos podem ser classificados segundo a origem e a sua biodegradabilidade. Segundo a origem podem ser:

a) Residencial

É o chamado lixo domiciliar, constituído de restos de alimentação, invólucros diversos, varredura, folhagem, ciscos e outros;

b) Comercial

É proveniente de diversos estabelecimentos comerciais, como escritórios, lojas, hotéis, restaurantes, supermercados, quitandas e outros. É constituído principalmente de papéis, papelão, plásticos, caixas, restos de lavagem, etc.;

c) Industrial

Proveniente de diferentes áreas da indústria, e portanto, de constituição muito variada;

d) Hospitalar

É constituído de resíduos das mais diferentes áreas do estabelecimento: refeitório e cozinha, área de patogênicos, administração, limpeza e outros;

e) Especial

Lixo constituído por resíduos e materiais produzidos esporadicamente como: folhagem de jardim, restos de poda, animais mortos, entulhos;

f) Feira, varrição e outros

Proveniente de varrição regular de ruas, conservação e limpeza de núcleos comerciais, limpeza de feiras, constituindo-se de papéis, cigarros, invólucros, restos de capinação, areia, cisco e folhas.

Segundo o grau de biodegradabilidade, tem-se os Facilmente Degradáveis (matéria orgânica), Moderadamente Degradáveis (papel, papelão e outros produtos celulósicos), Difícilmente Degradáveis (trapo, couro, borracha e madeira), e os Não Degradáveis (vidro, metal, plástico, pedras, terra e outros).

3.3 Gerenciamento de resíduos sólidos

DIAZ (1993) ressalta que um sistema integrado de gerenciamento de resíduos sólidos é aplicável a todas as etapas de manuseio de resíduos sólidos municipais, começando com a geração do resíduo e continuando com armazenamento coleta, transporte e no tratamento e destino final. O autor cita ainda que a boa qualidade do meio ambiente é uma necessidade, não um luxo.

TCHOBANOGLIOUS et al. (1993) definem gestão integrada de resíduos sólidos como sendo toda a atividade associada como gerenciamento do resíduo da sociedade. O objetivo básico é gerenciar o resíduo de maneira que una os interesses ambientais e de saúde pública com o desejo da população de reusar e reciclar os resíduos. Ainda segundo os autores, as etapas que fazem parte do gerenciamento, desde o ponto da geração até o destino final, são: geração do resíduo; manuseio e separação na fonte, armazenagem e processamento na fonte; coleta; separação para processamento e transformação de resíduos; transferência e transporte; e disposição.

a) Geração do resíduo

A geração de resíduos engloba atividades nas quais os materiais são identificados como sendo sem valor e que são jogados fora. É uma etapa que não é muito controlada. No futuro, entretanto, será uma atividade que será mais controlada visando uma maior redução na fonte.

b) Manuseio e separação, armazenagem e processamento na fonte

O manuseio e a separação de resíduos envolvem as atividades associadas com o gerenciamento até a etapa de colocação dos mesmos

nos containers, ou sacos plásticos, para a coleta. O manuseio também engloba o deslocamento até o ponto de coleta. A separação dos componentes é uma etapa importante no manuseio e armazenagem do resíduo na fonte, pois o melhor lugar para se separar materiais para reuso e reciclagem é na fonte de geração. A armazenagem é de suma importância pois leva em consideração a saúde pública e aspectos estéticos. Geralmente o custo da armazenagem é do gerador do lixo. Quanto ao processamento na fonte, são as atividades realizadas como as de compactação e a compostagem de podas de jardim.

c) Coleta

TCHOBANOGLIOUS et al. (1993) definem que a coleta também inclui o carregamento até o local onde o veículo será descarregado. Esse local pode ser um aterro sanitário, lixão, aterro controlado, ou mesmo uma estação de transferência. Em cidades pequenas, onde o local para disposição final fica perto, não se considera um grande problema o carregamento dos resíduos. Entretanto em grandes cidades, onde o destino final fica muito longe, o carregamento tem grandes implicações econômicas. Quando grandes distâncias são envolvidas, são utilizadas estações de transferência e transporte.

d) Separação e processamento de resíduos

A separação e processamento de resíduos que foram segregados na fonte e a separação dos resíduos que foram coletados juntos geralmente ocorrem em unidades de recuperação de materiais, estações de transferência, unidades de combustão e locais de disposição final. O processamento geralmente inclui a separação de materiais volumosos, separação de componentes por peneiramento, separação de matéria orgânica para compostagem, separação manual, redução de tamanho por

meio de trituração, separação de metais ferrosos usando ímãs, redução do volume por compactação e combustão.

e) Transferência e transporte

Esta etapa envolve dois passos: a transferência dos resíduos de um caminhão menor para outro de maior volume, e o subsequente transporte dos resíduos, geralmente a longas distâncias, para o local de processamento ou disposição. A transferência é feita usualmente em estações de transferência. Embora o transporte mais comum seja o de caminhão, trens e barcaças são também utilizados para o mesmo fim.

f) Disposição

A disposição dos resíduos é o destino final de todos os rejeitos, sejam eles de origem residencial coletados e transportados diretamente para um aterro (ou outro local determinado), resíduos de materiais de unidades de recuperação de materiais, resíduos da combustão ou pirólise, resíduos de compostagem, ou outras substâncias oriundas das várias unidades de processamento de resíduos.

3.4 Características do lixo e problemática do tratamento e destino final

Para se pensar em gerenciamento integrado, faz-se necessário conhecer as características do lixo, tais como volume e densidade, para poder dimensionar a frota de coleta; composição química e umidade, para obter parâmetros para pirólise ou incineração; quantidade de matéria orgânica, para saber se é viável um processo de compostagem. Some-se a isto a relação custo/benefício que cada destinação oferece.

O problema de tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos continua sendo uma preocupação constante dos técnicos e dos administradores de todas as grandes cidades do mundo, segundo o Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba - IPPUC (1981). Nenhuma solução ideal foi encontrada, havendo em cada região uma tendência para alguns tipos de solução, em face das condições locais de disponibilidade de terras e na disponibilidade de fontes de energia. Assim, entre os sistemas clássicos de tratamento, na Europa a tendência parece conduzir para os incineradores, enquanto que na América é para os aterros sanitários. Usinas de compostagem são encontradas em diversos locais do mundo. Evidentemente a falta de locais apropriados e disponíveis para aterro conduz a solução para a incineração ou para outros processos em fase de experimentação.

A seguir é mostrado uma síntese das várias hipóteses de tratamento e destino final dos resíduos sólidos urbanos, segundo IPPUC (1981):

a) Descarga livre

São os chamados lixões, bota-fora ou vazadouros. JARDIM et al. (1995) citam que o lixão é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos, que se caracterizam pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Os resíduos assim lançados acarretam problemas à saúde pública, como proliferação de vetores de doenças (moscas, mosquitos, baratas, ratos, etc.), geração de maus odores e, principalmente, a poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas através do chorume. Pode-se citar ainda o problema social, que é a presença de catadores na área em questão.

b) Aterros

Os aterros mais usuais são o aterro controlado e o aterro sanitário. O aterro controlado utiliza os princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho. Essa forma de disposição, segundo JARDIM et al. (1995), produz, em geral, poluição localizada, pois a extensão da área de disposição é minimizada. Porém, geralmente não se dispõe de impermeabilização de base (comprometendo as águas subterrâneas), nem de sistemas de tratamento de chorume e tratamento de gases gerados. É um método preferível ao lixão, mas, devido aos problemas ambientais que causam e aos seus custos de operação, é inferior ao aterro sanitário.

O aterro sanitário é um método de disposição fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas que permite uma confinamento segura em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública. O método caracteriza-se por minimizar a poluição e/ou contaminação ambiental, especificamente das águas subterrâneas; garantir, tanto quanto possível, uma decomposição anaeróbia da matéria orgânica; impedir o surgimento de focos de fogo e fumaça, através de tubulações de escoamento dos gases formados, bem como de vetores, e evitar a atividade social marginal da catação.

c) Incineração

É a queima de materiais em alta temperatura (geralmente acima de 900°C), em mistura com uma quantidade de ar e durante um tempo predeterminado. No caso da incineração do lixo, compostos orgânicos são reduzidos a seus constituintes minerais, principalmente, dióxido de carbono gasoso e vapor d'água e a sólidos inorgânicos (cinzas). A incineração tem a vantagem de reduzir drasticamente o volume a ser descartado, reduzir o

impacto ambiental de aterros, eliminar patogênicos e pode ser uma fonte de recuperação de energia para produção de vapor ou eletricidade. A desvantagem da incineração é a de apresentar um custo elevado, exigir mão de obra qualificada, e acarretar problemas operacionais e de formação de gases tóxicos, devido a variabilidade da composição do lixo.

d) Pirólise

É um processo de decomposição térmica, sob uma atmosfera livre de oxigênio, que transforma substâncias complexas em simples, pela utilização do calor. A pirólise ocorre em temperaturas inferiores a da incineração, com produção de líquidos ou gases de alto conteúdo energético, sem poluição atmosférica apreciável.

e) Outros sistemas

Podemos considerar, neste item, os sistemas de reciclagem de vidros, reciclagem de papel e papelão, metais, plásticos, matéria orgânica, etc. Além disso pode-se citar a trituração e lançamento nos esgotos, lançamento ao mar. O grande problema do lançamento nos esgotos é o aumento da carga orgânica que, se não tratada em estações de tratamento de efluentes (ETE), pode acarretar sérios problema de poluição de recursos hídricos. Quanto ao lançamento ao mar, essa alternativa está cada vez mais sendo descartada, visto as pressões de organizações ecológicas e governos de vários países . A compostagem pode ser vista como um processo de reciclagem, pois devolve ao solo constituintes que foram removidos pelos alimentos durante o seu crescimento, tais como: nitrogênio, fósforo, carbono, além de fornecer outros minerais e matéria húmica. O processo de compostagem é um dos passos envolvidos em um sistema de gestão integrada de resíduos sólidos e o seu processo será detalhado mais adiante.

CALDERONI (1997) cita que a reciclagem do lixo apresenta relevância ambiental econômica e social, com implicações que se desdobram em esferas como as seguintes: preservação e uso racional dos recursos naturais, já que as reservas de matéria prima tendem a decrescer mais lentamente com o uso de material reciclado; conservação e economia de energia, pois a energia consumida para se promover o retorno do material reciclado é menor que a energia gasta para se obter um produto novo, devido ao produto reciclado precisar de menos etapas para fabricação; desenvolvimento de produtos, tais como os compósitos que são materiais compostos de vários outros produtos, geralmente reciclados; finanças públicas, pois o material reciclado diminui o volume de lixo a ser descartado, diminuindo assim os custos de transporte; saneamento básico e proteção da saúde pública, pois diminui o volume de lixo a ser jogado fora, diminuindo assim os riscos de contaminação; geração de renda, pois criam-se vagas com a implantação de usinas de reciclagem, além da economia informal dos catadores; redução de desperdícios.

O autor ainda ressalta que a necessidade e a importância da reciclagem do lixo advém essencialmente de um conjunto de fatores, cuja dimensão espacial constitui condicionante fundamental, como segue: exaustão de matérias-primas, já que as reservas de matérias-primas são fontes esgotáveis; custos crescentes de obtenção de matérias-primas, pois, com o decréscimo das fontes, aumenta o valor da matéria prima, além de aumentar o custo de transporte devido a matéria prima ficar cada vez mais longe do centro beneficiador; economia de energia, já que se consome menos energia na reciclagem do produto que na fabricação de um novo; indisponibilidade e custo crescente dos aterros sanitários, pois o custo de terras perto dos centros urbanos é sempre maior, além de terrenos grandes próximos dos centros urbanos serem cada vez mais escassos; custos de transporte crescentes. A figura 3.1 dá uma visão geral de um sistema integrado de gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos.

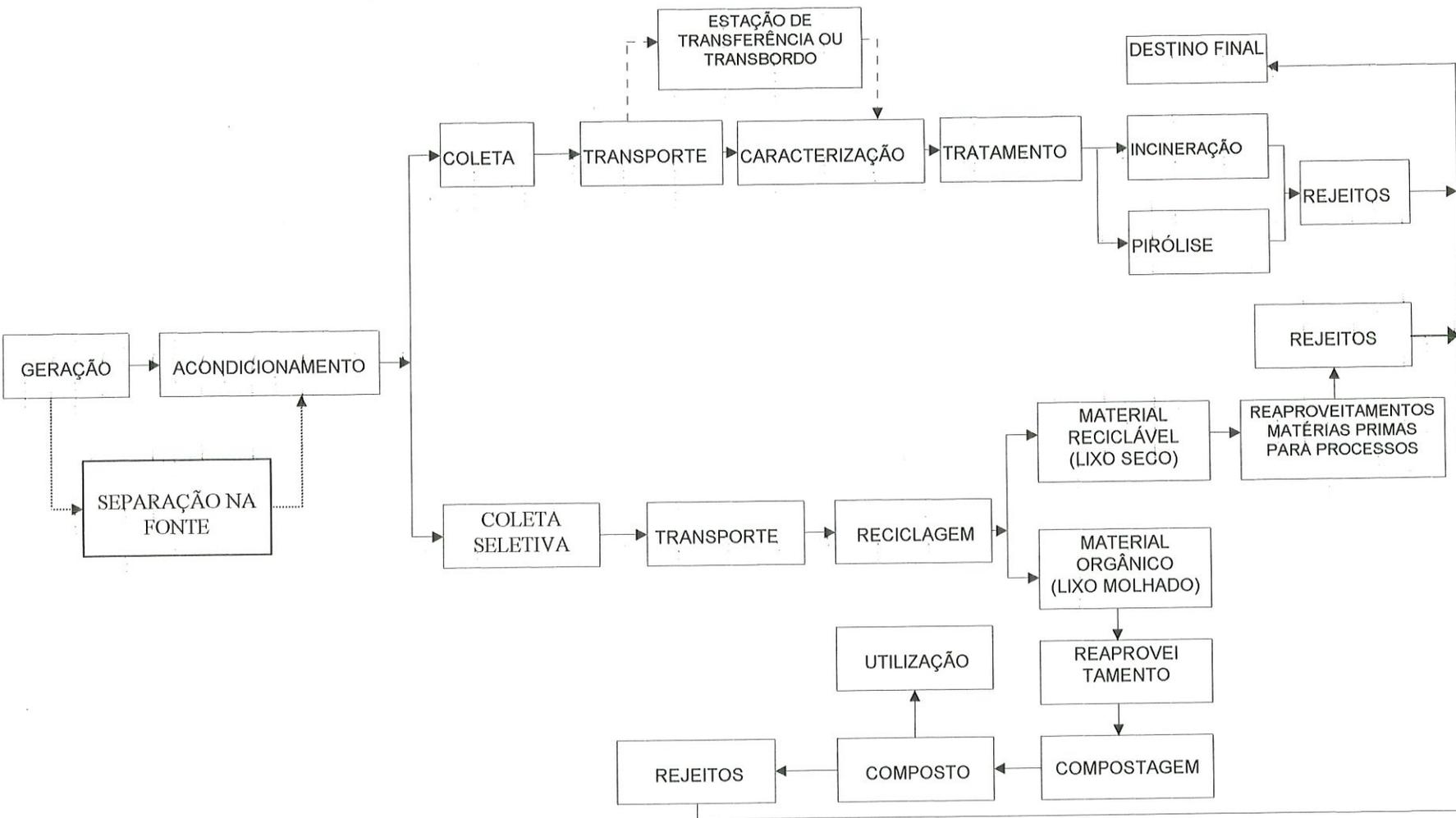


Figura 3.1 Operações efetuadas na área de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Adaptado de Schalch (1992)

3.5 Compostagem

PEREIRA NETO (1989) define compostagem como sendo um processo aeróbio controlado, desenvolvido por uma colônia mista de microrganismos, efetuado em fases distintas: a primeira, quando ocorrem as reações bioquímicas de oxidação mais intensas predominantemente termofílicas, a segunda, ou fase de maturação, quando ocorre o processo de humificação. O período de compostagem depende fundamentalmente do processo a ser utilizado e do tipo de material a ser compostado. Geralmente varia de 25 a 35 dias para a primeira fase e de 30 a 60 dias para a segunda fase.

KIEHL (1985) define compostagem como uma técnica idealizada para se obter mais rapidamente e em melhores condições a desejada estabilização da matéria orgânica.

Em outra definição, DIAZ et al. (1993) citam que compostagem é uma decomposição biológica de resíduos consistindo em substâncias orgânicas de origem animal ou vegetal, sob condições controladas, para um estado suficientemente estável para estocagem e utilização. Uma definição para "decomposição biológica" é que somente resíduos orgânicos de origem vegetal ou animal podem ser decompostos biologicamente, embora, em raras circunstâncias, alguns microrganismos podem atacar materiais de origem não biológica. O termo "sob condições controladas" distingue a compostagem da decomposição ordinária que se tem na natureza.

RICHARD (1992) define compostagem como uma intervenção humana no processo natural de decomposição. Com uma combinação de condições ambientais propícias e um tempo adequado, os microrganismos transformam a matéria orgânica putrescível em um produto estabilizado.

Os resíduos utilizados podem ser constituídos de restos agrícolas, esterco de animais ou resíduos urbanos, separadamente ou combinados (Conselho Nacional de Desenvolvimento Urbano - CNDU, 1979). Além disso, podem ser misturados com os lodos provenientes das estações de tratamento de esgotos, que são ricos em nitrogênio.

A compostagem de restos agrícolas é tão antiga quanto o preparo do solo para culturas. LOPEZ-REAL (1996) cita que a compostagem de resíduos fecais humanos, juntamente com vegetais e esterco animal, tem sido praticada na China por séculos e tem sido considerada a responsável por manter a fertilidade do solo por mais de 4000 anos.

Originalmente, os processos utilizados eram rudimentares, baseados na formação de montes que eram revirados ocasionalmente. Ainda hoje são empregados estes processos em pequenas propriedades agrícolas. O aumento da fertilidade do solo era baseado exclusivamente na utilização de matéria orgânica, inclusive composto, até meados do século passado, quando o conhecimento dos resultados obtidos através de pesquisas agrícolas, o desenvolvimento dado à tecnologia de aplicação e o conseqüente incremento de produção levaram ao emprego de adubos minerais, em detrimento da utilização de adubos orgânicos (CNDU, 1979).

Observações cuidadosas posteriores permitiram constatar que só a adubação mineral não era suficiente para elevar o índice de fertilidade do solo agrícola, o que justificou o retorno ao uso de adubos orgânicos, voltando, portanto, a compostagem a ser estudada como ciência, estimulando assim a implantação de novas usinas.

No início da década de vinte, começaram a aparecer processos especialmente desenvolvidos para o tratamento biológico controlado dos resíduos sólidos. Como resultado de uma série de experimentações, Sir

Albert Howard desenvolveu em Indore, Índia, um sistema de produção de composto contendo as características desejadas. A partir dessa época, foram sendo desenvolvidos diversos sistemas, sendo alguns patenteados. O objetivo dessa tecnologia era mecanizar o processo o máximo possível para reduzir a mão de obra empregada que, no processo Indore, era muito grande e onerosa.

PEREIRA NETO (1996) cita que o interesse pela compostagem no Brasil tem crescido devido ao fato que o lixo urbano tem uma composição média de 60% de materiais putrescíveis. Esta quantidade de material putrescível, quando disposta em lixões ou em aterros não controlados, forma um habitat natural para vetores de doenças como moscas, ratos, cães, etc. O efeito disto é aumentado com uma população que sofre de má nutrição (25% da população brasileira). Outro problema associado com a putrefação nestes locais é a grande quantidade de chorume gerado, o qual freqüentemente flui para mananciais de abastecimento humano, animal, irrigação, etc.

O autor ainda cita que esse interesse é aumentado também por causa do decaimento da fertilidade do solo devido a falta de matéria orgânica. Para compensar a perda da fertilidade do solo, existe uma procura por fertilizantes inorgânicos, que são caros. A alta taxa de perda de matéria orgânica nos solos em áreas tropicais é um aspecto particular em climas quentes. O efeito da redução da fertilidade do solo é aumentado devido ao crescimento populacional, o qual implica em mais pessoas para alimentar e mais pressão sobre o solo exaurido.

SENESI e BRUNETTI (1996) citam que a compostagem é considerada como o tratamento mais eficiente para se produzir um condicionador de solos vantajoso agrônomicamente e ambientalmente a custos operacionais aceitáveis.

Sob o ponto de vista industrial e/ou comercial, SCHALCH(1995) cita algumas vantagens deste processo: possibilita a recuperação de matéria prima (reciclagem de lixo); uma boa localização da usina possibilita reduzir o transporte do lixo; como o processo pode ocorrer em ambientes fechados, a ação das condições meteorológicas não influirão no mesmo; os rejeitos (que sempre vão existir) podem ser dispostos em aterros sanitários sem problemas; a instalação da usina de compostagem não causa problemas de poluição atmosférica ou hídrica; pouca mão de obra especializada é necessária para o funcionamento do processo; comparativamente à incineração, os custos são bem menores.

Como desvantagens SCHALCH (1995) cita: é um método de disposição parcial (aproximadamente 50% dos resíduos não são aproveitados para a produção do composto), sendo necessária instalações complementares (incinerador, aterro sanitário); se a cura do composto ocorrer a céu aberto, dificuldades surgirão devido à provável ocorrência de chuvas e ventos; a importância de que exista mercado para o composto é crucial. Flutuações excessivas no preço do composto podem comprometer o andamento das usinas, sendo então condição principal para este método a garantia de existência de consumidores para o material produzido.

3.5.1 Classificação dos Métodos de Compostagem

Pode se classificar os métodos de compostagem segundo quatro diferentes fatores (KIEHL, 1985).

a) Aeração

Quanto a aeração o processo pode ser Aeróbio, que se caracteriza pela presença de oxigênio no interior da massa. As temperaturas são elevadas e ocorrem desprendimento de CO₂ e vapor d'água. A matéria

orgânica é rapidamente biodegradada; Anaeróbio, que se caracteriza pela baixa temperatura de fermentação, pela ausência do oxigênio e pelos gases que desprendem (principalmente o metano, além do gás sulfídrico e dos mercaptanos). A biodegradação é lenta comparativamente ao aeróbio.

A biodegradação aeróbia ocorre quando o oxigênio livre se encontra presente na massa de lixo em suprimento adequado. Essa condição é mantida com o revolvimento periódico do lixo, ou pela insuflação de ar, ou ainda por ambas as formas. Durante o processo, há a liberação de calor decorrente das reações bioquímicas, elevando a temperatura da massa do lixo a até cerca de 70° C. Os produtos finais são dióxido de Carbono (CO₂), água, nitratos e um material tipo húmus, estabilizado e constituído de matéria orgânica livre de bactérias patogênicas (PINTO, 1979).

Na biodegradação anaeróbia, os organismos anaeróbios, ao metabolizarem os nutrientes, decompõem os compostos orgânicos por um processo de decomposição lento e usualmente acompanhado de desprendimento de odores desagradáveis (H₂S) e de produtos da redução de compostos orgânicos que contém enxofre (mercaptanas). O lixo é confinado em celas metálicas ou de concreto a fim de minimizar a entrada de oxigênio. No início do processo, geralmente usa-se injetar CO₂ no interior das câmaras a fim de se expulsar o oxigênio livre existente (PINTO, 1979).

b) Temperatura

Quanto à temperatura, os processos podem ser criofílicos, que ocorrem geralmente em meios anaeróbios, onde as temperaturas são baixas e próximas ou menores que a do ambiente; mesofílicos, onde a faixa de temperatura neste tipo de compostagem situa-se em 40 e 45° C, e termofílicos, onde a temperatura é maior que 45° C, podendo ultrapassar os

70° C se existirem condições de contorno especiais que favoreçam o processo e se a atividade microbiológica for muito intensa.

c) Ambiente

Quanto ao ambiente, segundo HAUG (1993), os processos podem ser abertos, que são divididos entre aqueles em que se mantém o leito de sólidos agitado, e aqueles em que se mantém um leito de sólidos estático. Um leito de sólidos agitado é aquele em que o material a ser compostado (substrato) é mexido de alguma maneira durante o período de compostagem. Pode ser por reviramento periódico ou outro método de agitação.

No ambiente fechado os processos em reatores são divididos em reatores de fluxo horizontal e vertical. Nos reatores com fluxo vertical o substrato entra no topo do reator e vai em direção ao fundo, com o ar entrando em contra corrente. O reator pode ou não ter agitação. Os processos com reatores horizontais são divididos entre os que empregam tambores rotatórios, os que usam receptáculos com geometria e formas de agitação variadas, e aqueles que usam receptáculos com leito de sólidos estático.

A compostagem em leiras é o exemplo mais popular de um sistema a céu aberto de leito agitado. Os substratos são colocados em forma de leiras e revirados periodicamente. A altura, forma e comprimento da leira podem variar dependendo da natureza do material e do tipo de equipamento usado para o reviramento.

A pilha estática também é o mais popular tipo de compostagem a céu aberto que emprega o sistema de leito estático. O substrato é misturado com um material para dar suporte estrutural, tal como raspa de

madeira, e para promover uma melhor aeração em torno da pilha através dos vazios deixados pelo material suporte. Um sistema de distribuição de ar é implantado por baixo da pilha para promover a entrada forçada de ar e promover o processo de compostagem. Nesse tipo de sistema não há reviramento.

A compostagem em ambiente aberto exige maior área que em ambiente fechado, a não ser quando os dois processos são associados; na decomposição em pátio o tempo de cura geralmente é maior, ocupando as pilhas maior espaço além daqueles perdidos com os corredores por onde se movimentam as máquinas operatrizes. Nos processos fechados o revolvimento do composto é feito no próprio digestor, de onde vai diretamente para o galpão de armazenamento (KIEHL, 1985).

d) Tempo

Quanto ao tempo de compostagem, os processos podem ser lentos, onde a matéria prima a ser fermentada é disposta em montes nos pátios de compostagem após sofrer separação de materiais não decomponíveis, recebendo revolvimentos periódicos para arejar e ativar a fermentação (compostagem natural); e acelerados, onde é proporcionado tratamento especial à matéria prima, melhorando as condições para fermentação, principalmente o arejamento e o aquecimento.

A compostagem em pátio com injeção de ar nas pilhas de composto ou exaustão de seus gases, tem sido referido na literatura como processo acelerado (KIEHL, 1985).

3.5.2 Fatores que Influenciam na Compostagem

A compostagem, como processo biológico, é afetada por qualquer fator que possa influenciar a sua atividade microbológica (PEREIRA NETO, 1989). Os principais fatores que influenciam neste aspecto são descritos a seguir:

a) Aeração

A aeração é o principal mecanismo para se evitar os altos valores de temperatura durante o processo, aumentar a velocidade de oxidação do material orgânico e diminuir a emissão de odores (PEREIRA NETO, 1989). A compostagem deve ser feita em ambiente aeróbio, pois com a abundância de ar a decomposição, além de mais rápida e melhor conduzida, não produz cheiro nem proliferação de moscas, o que consiste em um fator estético para o local e recomendável para a saúde pública (KIEHL, 1985). Pode-se fazer a aeração mecânica, por insuflação de ar, ou por revolvimento das leiras.

b) Temperatura

O metabolismo dos microrganismos é exotérmico; na fermentação aeróbia, principalmente, desenvolve-se um natural e rápido aquecimento da massa com a multiplicação da população microbiana. De maneira geral, certos grupos de organismos tem uma faixa de temperatura ótima de desenvolvimento; é tão importante a manutenção da temperatura ótima para os microrganismos, que uma variação para mais ou para menos, provoca uma redução da população e da atividade metabólica (KIEHL, 1985). A compostagem moderna está mais associada ao desenvolvimento de temperaturas mesofílicas, controladas na faixa de 55°C, o que, segundo PEREIRA NETO (1989), garante uma série de vantagens, como:

desenvolvimento de uma população microbiótica diversificada; aumento da taxa de decomposição de matéria orgânica; ação, como o mecanismo mais importante, para a eliminação de microrganismos patogênicos; eliminação de sementes de ervas daninhas, ovos de parasitas, larvas de insetos. A compostagem desenvolvida sem o controle de seus fatores básicos permite o desenvolvimento de temperaturas elevadas (65 a 80° C). Isto é pernicioso a atividade microbiológica da degradação, porque retarda o período a compostagem, além de interferir na qualidade do composto (PEREIRA NETO, 1989).

c) Umidade

Os processos bioquímicos de decomposição exigem água. Assim, na compostagem, é mantida uma faixa de umidade que varia de 40 a 60 % de peso seco da matéria orgânica decomponível. Teores de umidade abaixo de 40 % retardam o processo por inibir a atividade biológica. Umidade acima de 60% torna o meio anaeróbio por baixar o potencial de óxido-redução, reduzindo a eficiência do processo por estímulo à concorrência microbiológica (LIMA, 1995).

d) Microrganismos

A conversão da matéria orgânica crua, biodegradável, ao estado de matéria prima orgânica humificada, realizada pela compostagem, é um processo microbiológico operado na natureza por organismos, classificados como bactérias, fungos e actinomicetes, principalmente. Durante a compostagem há uma sucessão de predominância de microrganismos; é que, conforme a influência de determinados fatores - substância química, matéria prima que está sendo digerida com maior intensidade, teor de umidade, disponibilidade de oxigênio (governada pela aeração que se dá à massa), temperatura (selecionando os microrganismos mesófilos e

termófilos), relação carbono/nitrogênio e o pH - certos microrganismos multiplicam-se mais rapidamente, predominando no meio a fermentação. Digerida a substância química responsável pelo aumento de determinada população de microrganismos, alterando-se também alguns dos fatores citados, tais organismos vão morrendo e cedendo lugar a uma nova e diferente população, a qual passará a dominar a massa (KIEHL, 1985).

e) Relação C/N

A relação carbono/nitrogênio serve como um indicador de fases. Assim, no início da compostagem a relação carbono/nitrogênio deve ser da ordem de 30/1 e no final do processo, ou seja, na completa maturação, de 10/1. Na compostagem o carbono representa o material energético necessário para a ativação do processo de síntese celular e o nitrogênio, o material básico para a constituição da matéria celular sintética. Se o quociente é demasiado grande, os microrganismos não terão o material plástico necessário para construir a própria matéria celular, além do que, necessitarão realizar inúmeros ciclos vitais para eliminar o excesso de carbono na forma de gás carbônico e de protoplasma de albuminóide (KIEHL, 1979). Ao contrário, se o nitrogênio apresenta abundância em relação ao carbono, pode-se verificar excessiva solubilidade do nitrogênio e sua conseqüente perda na forma de NH_3 gasoso.

Consideram-se os limites de 26 e 35 como sendo as relações carbono/nitrogênio mais recomendadas para uma rápida e eficiente compostagem. Relações baixas causam perdas praticamente inevitáveis de nitrogênio na forma de amônia, enquanto que altas relações tornam o processo prolongado (KIEHL, 1985).

3.6 Características do Composto Orgânico

O composto orgânico do lixo, quando preparado tecnicamente, pode melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, daí sua classificação como adubo orgânico ou como condicionador de solo. As funções e efeitos do composto na produção agrícola e no solo são inúmeras. Entretanto deve-se lembrar que este não pode substituir inteiramente os fertilizantes químicos contendo N.P.K. (LIMA, 1993).

PINTO (1979) relaciona algumas vantagens do composto, tais como: retenção de umidade do solo em períodos de seca; prevenção contra a erosão; aumento da permeabilidade à água durante os períodos de chuva; melhoria das propriedades biológicas do solo, com aperfeiçoamento de sua microestrutura; fornecimento de alimentos-traço, balanceados com a ação do húmus presente; fornecimento de alguns nutrientes principais; prevenção da lixiviação do nitrogênio orgânico. POLPRASERT (1989) cita outras vantagens do composto, que são as que se seguem:

a) Estabilização do resíduo

As reações biológicas que ocorrem durante a compostagem convertem a forma putrescível em forma estabilizada, principalmente em forma inorgânica, que causa muito menos danos se jogada na terra ou num curso d'água;

b) Inativação dos patogênicos

O calor produzido biologicamente durante a compostagem pode alcançar uma temperatura de, mais ou menos, 60° C, a qual é suficiente para inativar a maioria das bactérias patogênicas, vírus e ovos de helmintos;

c) Nutrientes

Os nutrientes (N, P, K) presentes nos resíduos estão usualmente na forma de complexos orgânicos, dificultando a assimilação pelas plantas. Depois da compostagem estes nutrientes estarão na forma inorgânica, tais como NO_3^- e PO_4^- , que são assimilados pelas plantas. Além disso, a aplicação de composto como fertilizante reduz a perda por lixiviação porque os nutrientes estão na forma insolúvel, o qual é mais difícil de lixiviar do que a forma solúvel presente nos resíduos não compostados.

3.7 Monitoramento da Estabilização da Matéria Orgânica

A compostagem é um processo usualmente empregado no tratamento de larga variedade de resíduos orgânicos. Conseqüentemente, tem sido extremamente difícil precisar todas as mudanças bioquímicas que ocorrem durante o processo. Porém a degradação biológica pode ser descrita, em aspectos gerais, segundo um paralelo feito entre a atividade microbiológica e a temperatura, que governa uma fase particular do processo (PEREIRA NETO, 1989).

No início da compostagem, a matéria orgânica passa pela fase latente, que corresponde ao tempo necessário para os microrganismos se aclimatarem com o ambiente em que estão inseridos. Após a fase latente, vem a fase de crescimento, que é caracterizado pelo aumento da temperatura, devido a ação microbiana, até a temperatura mesofílica (letra "a" na figura 3.2).

A fase termofílica, na qual a temperatura aumenta até o máximo valor é a fase onde a destruição dos patogênicos é a mais efetiva (letra "b" na figura 3.2). Após essa fase, vem a fase de maturação, onde a temperatura

decrece até a fase mesofílica e permanecerá por tempo geralmente mais longo que o da fase anterior; finalmente, após 100 a 120 dias, dificilmente em menor prazo, com a estabilização completa do composto quando a matéria orgânica estará humificada, a temperatura baixará mais ainda, mantendo-se próxima ou igual a do ambiente; nesse ponto atingiu-se a estabilização completa do composto, estando a matéria orgânica humificada.

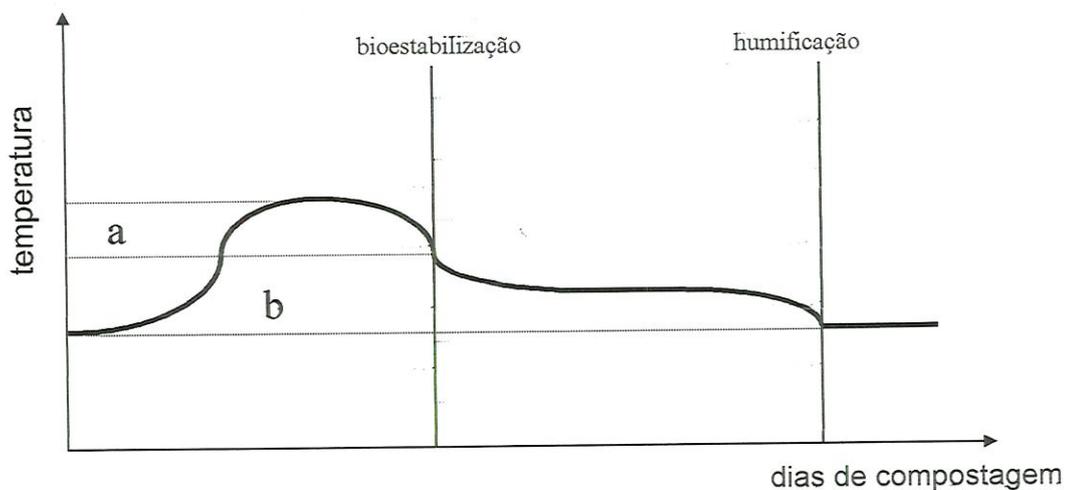


Figura 3.2 - Curva padrão de temperatura durante a compostagem

a= fase termofílica b= fase mesofílica Fonte : KIEHL (1985)

POLPRASERT (1989) cita que é difícil precisar as reações bioquímicas presentes na compostagem devido as variações dos resíduos. Eles variam desde a heterogeneidade dos resíduos urbanos até a virtual homogeneidade dos resíduos da indústria de processamento de alimentos. As reações são muito complexas, encontrando várias reações intermediárias e vários caminhos. O autor cita como exemplo a quebra das proteínas e carboidratos. A proteína é quebrada em polipeptídeos, que por sua vez se transformam em aminoácidos, compostos de amônia, protoplasma bacteriano e nitrogênio ou amônia. Já os carboidratos se

transformam em açúcares simples, que por sua vez se transformam em ácidos orgânicos, gerando o CO_2 e protoplasma bacteriano.

Na figura 3.3 tem-se gráficos, obtidos por KIEHL (1985) que mostram a tendência de aumento ou redução de diversos parâmetros conforme o tempo de compostagem. Os gráficos mostram uma tendência padrão para cada parâmetro analisado.

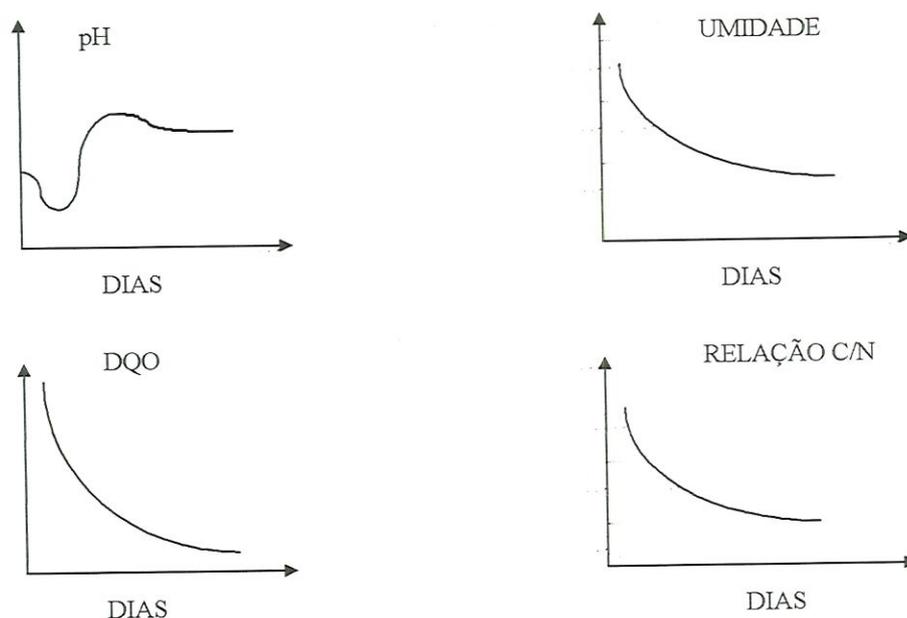


Figura 3.3 Tendências de aumento ou redução de diversos parâmetros, conforme o tempo de compostagem (KIEHL, 1985).

A prática demonstrou que se pode estabelecer uma relação aproximada entre a temperatura do processo e o grau de decomposição, quando tudo ocorrer normalmente. Considera-se que após a fase termófila o composto deve estar semicurado ou bioestabilizado e, após a nova fase mesófila, quando se esfriar, estará completamente estabilizado ou humificado. (KIEHL, 1985). MASIANI e DOMEIZEL(1996) citam que embora vários testes tenham sido desenvolvidos para monitoramento da matéria orgânica, os parâmetros que são geralmente utilizados para o monitoramento são a umidade, oxigênio, temperatura e pH. A

bioestabilização e a humificação devem ser confirmadas por outras informações, tais como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Umidade, Nitrogênio, relação Carbono/Nitrogênio, pH, teor de humificação, etc. Alguns autores, como JIMENEZ e GARCIA (1991), BARBERIS e NAPPI (1996), CHEN et al. (1990), HARADA e INOKO (1980) utilizam-se de mais alguns parâmetros para acompanhamento da compostagem, como Capacidade de Troca de Cátions, Condutividade elétrica, etc.

O que se vê na prática é o acompanhamento da compostagem apenas pela análise da temperatura e/ou teor de carbono visto que são parâmetros relativamente fáceis de se determinar na fração sólida do resíduo. HAUG (1991) cita que existe um grande número de fatores que têm limitado a aplicação de testes de laboratório em substratos de compostagem, porque os testes padrões de DBO e DQO são feitos para amostras líquidas de pequeno volume e não são bem ajustadas para resíduos sólidos ou semi sólidos e também porque os equipamentos de laboratório, mais adequados para grandes volumes e substratos sólidos, são caros e não comumente disponíveis em laboratórios de Saneamento.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Introdução

Para o processo de avaliação da compostagem foi escolhido como substrato matéria orgânica de uma usina de lixo. A usina está situada na cidade de Araraquara - SP e fica a cerca de 50 Km de distância da cidade de São Carlos - SP, onde foram feitas as análises.

A usina de lixo de Araraquara é gerenciada pela CONSTRUFERT - Indústria e Comércio Ltda., uma empresa pertencente ao Grupo Faria, que também atua nas áreas de Limpeza Pública, Construção Pesada, Mineração, Revendas de veículos, entre outros.

4.2 Características do lixo estudado

O lixo domiciliar, quando chega a usina, é depositado em um pátio pavimentado, depois vai para um fosso de recepção e chega a esteira de seleção de materiais, onde será feita a separação da matéria orgânica e da matéria inorgânica (vidros papéis, papelão, metais e plásticos). Previamente separados, os materiais inorgânicos são enfardados e encaminhados para o pátio de armazenagem para aguardarem sua venda no mercado, com exceção de alguns tipos de plásticos que são reaproveitados pela CONSTRUFERT em sua unidade recuperadora. O que restou dessa triagem, matéria orgânica, segue para um triturador e depois segue para peneira de seleção de materiais para sofrer uma última separação. Livre ,

em grande parte, de resíduos inorgânicos, este material segue para as leiras de compostagem. As figuras 4.1 e 4.2 ilustram o caminho percorrido pelo lixo na Usina de Compostagem de Araraquara.

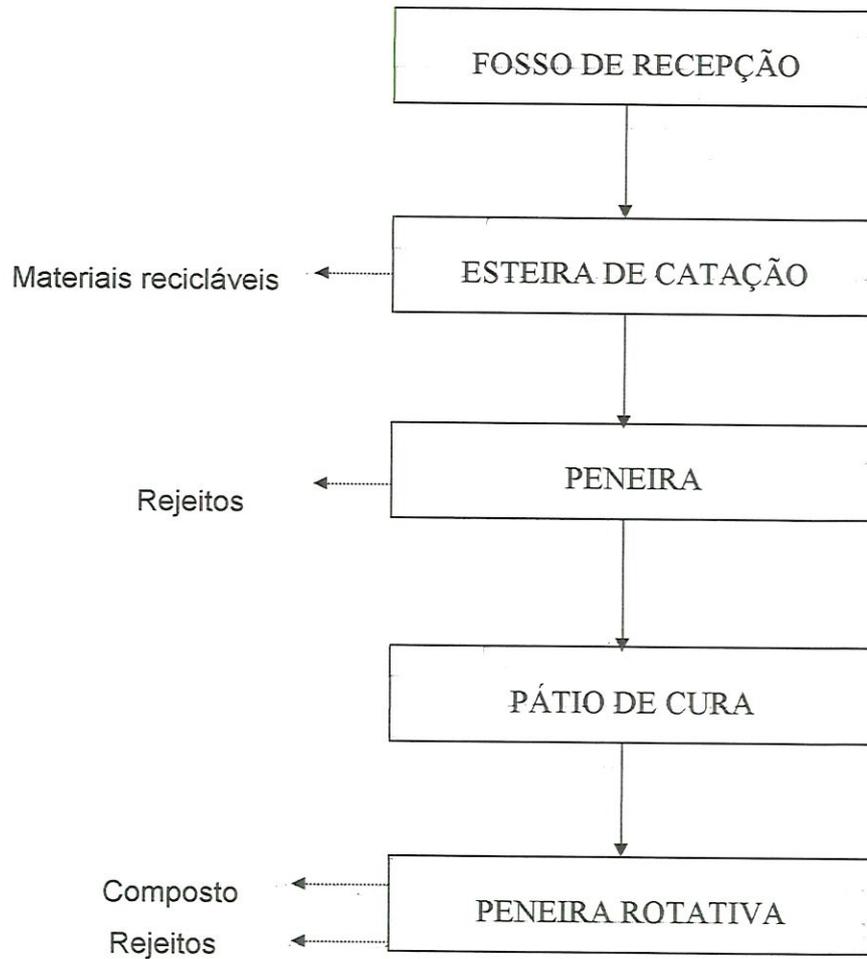


Figura 4.1 - Fluxograma do sistema de Compostagem da Usina de Lixo de Araraquara

Fonte: CASTRO (1996)



(a)



(b)



(c)



(d)

- a) Pátio de Recepção do lixo urbano
- b) Esteira de triagem
- c) Colocação do material a ser reciclado em fardos
- d) Peneira de seleção da matéria orgânica

Figura 4.2 - Etapas operacionais de segregação do lixo urbano da Usina de lixo de Araraquara (CONSTRUFERT, 1997).

Para executar a compostagem, a matéria orgânica é encaminhada para uma grande área dentro de empresa. Esta área foi devidamente revestida para evitar infiltração dos líquidos, provenientes da compostagem, no solo. Formando as leiras de compostagem, a matéria orgânica permanece ali por um período que varia de 90 a 120 dias, recebendo revolvimentos periódicos a fim de proporcionar a aeração da massa e obter um composto orgânico homogêneo.

Após este processo, a matéria orgânica passa duas vezes por um complexo sistema de peneiras rotativas, o que proporciona o seu refinamento, tornando sua granulometria ideal para aplicação.

Segundo estudos efetuados pela ESALQ (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP), constantes no folheto informativo da CONSTRUFERT (1997), o composto final apresenta a seguinte composição:

Umidade	23,48%
Matéria Orgânica	34,29%
pH	7,3
Carbono	19,05%
Nitrogênio Total	1,41%
Relação C/N	17,1

4.3 Construção da leira de estudo

A leira foi construída em uma área, devidamente cimentada para evitar a contaminação do solo e a contaminação do substrato pelo solo, gentilmente cedida pela empresa que gerencia o lixo. A área cedida tinha uma forma quadrada com 3,20 m de lado e foi equipada com quatro tubos de ferro, em cada aresta, para poder se colocar um toldo a fim de se evitar as chuvas e o sol forte (figura 4.3).



Figura 4.3 - Área cimentada para colocação da leira

O material para a compostagem, assim como todo o material que passa pela usina, foi passado pela triagem, peneiramento e em seguida foi depositada uma quantidade no local previamente estabelecido para ser o local da leira. Uma parte desse material foi utilizada para se fazer uma caracterização e a outra parte foi usada para a compostagem (figura 4.4).



Figura 4.4 - Colocação do lixo para caracterização e montagem da leira

A caracterização foi realizada seguindo o método de quarteamento segundo a NBR 10.007 (ABNT,1987), que consiste em se utilizar uma quantidade de lixo na forma de monte, misturar bem e em seguida dividir esse monte em quatro partes. Após a divisão, escolhe-se dois montes diagonais e mistura-se essas porções. Faz-se repetidamente essa operação até se obter uma quantidade aproximada de 100 Kg de lixo (ver Tabela 4.1). O objetivo da caracterização para o presente trabalho era somente para se dar uma idéia da composição do lixo estudado, já que uma caracterização representativa tem que ser feita durante várias vezes ao ano e, de acordo com SCHALCH (1997), deve-se levar em conta alguns fatores, tais como número de habitantes no local a ser utilizado para a caracterização, área relativa de produção, variações sazonais, condições climáticas, hábitos e costumes da população, nível educacional, poder aquisitivo, tempo e eficiência da coleta, tipo de equipamentos utilizados na coleta, disciplina e controle dos centros produtores, leis e regulamentações específicas.

Além desse fatores, deve-se levar em conta os turnos dos operadores da Usina, a maneira que como cada turno faz a triagem e limpeza das peneiras. A tabela 4.1 mostra os valores obtidos com a caracterização do substrato a ser estudado.

Tabela 4.1 - Composição do material utilizado (lixo após as etapas operacionais de segregação)

Componente	(base úmida) % (em peso)
Matéria orgânica	68,25
Papel e papelão	16,14
Plástico	8,27
Vidro	2,87
Metais	2,57
Outros (trapo, borracha, osso, etc.)	1,90

A parte utilizada para se fazer a compostagem foi colocada no quadrado cimentado e foi feito uma leira com dimensões aproximadas de 3,5 m de comprimento, 2,5 m de largura e 1,5 m de altura. GOTAAS* apud KIEHL (1985) cita que a experiência tem demonstrado que as dimensões ideais para as pilhas ou leiras são as seguintes: largura entre 2,5 a 3,5 m, a não ser que se empregue máquinas especiais de revolvimento ou se use processo de arejamento artificial, que recomendam outras dimensões; a altura não deve, no início, ultrapassar 1,5 a 1,8 m; a altura do composto se reduz a medida que a decomposição vai caminhando e de acordo com a resistência que os componentes oferecem ao acamamento; a altura pode baixar de um sexto a um terço da original, o peso pode diminuir de 50 a 80% e o volume total reduzir de 20 a 60% (figura 4.5).



Figura 4.5 - Leira após montagem

Segundo KIEHL (1985), a altura da pilha está relacionada com a largura. Para se ter pilhas mais altas é necessária montá-las mais largas, pois o ângulo que as laterais inclinadas fazem com a vertical gira em torno de 40 a 60 graus. Montando pilhas muito altas corre-se o risco das camadas

* GOTAAS, H.B. (1956). *Composting. Sanitary Disposal and Reclamation of Organic Wastes.* 38
World Health Organization.. Geneva.

superiores exercerem pressão sobre as inferiores, compactando-as; como conseqüência, o composto entra em putrefação e, conforme o conteúdo de água da matéria orgânica, a compressão provocará a expulsão de líquido, formando o chorume e perdendo-se os nutrientes solubilizados.

As pilhas altas aquecem-se mais, podendo alcançar temperaturas indesejáveis; as pilhas baixas, ao contrário, perdem calor mais facilmente ou nem se aquecem o suficiente para destruir patogênicos. Se as pilhas forem estreitas e baixas, haverá maior perda de umidade.

4.4 Monitoramento da leira

Após a montagem da leira foi feito um esquema de monitoramento da mesma, que consistia em verificar a sua temperatura, umidade e aeração.

Para a medição da temperatura foi utilizado o termômetro digital Minnipa-APPA modelo MT - 520 e equipado com um termopar feito em alumínio e medindo 1,5 m de comprimento. A medição da temperatura era feita em várias camadas da leira e em vários locais e depois era obtida uma média. O propósito de se fazer a medição, segundo PEREIRA NETO (1996) em várias camadas deve-se ao fato que a temperatura varia de acordo com a altura da leira. Foi feito também a medição da temperatura ambiente.

A umidade era verificada pela observação visual e pela temperatura. A observação visual consistia em constatar se a massa da leira tinha um aspecto "úmido" ou seco, ou ainda se estava com mau cheiro. A leira não poderia estar muito encharcada, pois, segundo RICHARD (1996b) afetaria a porosidade e dificultaria a aeração, favorecendo a anaerobiose. A medição da temperatura também influenciava na umidade, pois se a temperatura caísse durante a fase ativa do processo poderia ser um sinal de que a

umidade estava baixa o processo de decomposição tinha cessado. Como durante o período de monitoramento da leira a umidade relativa do ar estava muito baixa, chegando a dar níveis de 19%, a temperatura acusou uma queda e foi preciso aumentar a umidade através da adição de água.

Para dar oxigênio à massa, era feito um reviramento da leira. Inicialmente a leira era revirada duas vezes por semana e na fase de maturação, era revirada semanalmente.

4.5 Coleta de amostras

As amostras foram coletadas semanalmente, sempre coincidindo com o ciclo de reviramento. Para a coleta das amostras, foi seguida a metodologia proposta pela UNIVERSIDADE DE TORINO (s.d.) , que cita que antes de proceder a coleta das amostras, é aconselhável efetuar uma inspeção preliminar, com o objetivo de identificar a massa a ser amostrada e as modalidades de execução de operação.

Para obter uma amostragem estatisticamente representativa, além de colher dados sobre a tipologia dos resíduos tratados e sobre as características do sistema de compostagem, deve-se levar em conta os seguintes fatores:

- estado físico, heterogeneidade e eventual estratificação do material orgânico a ser amostrado;
- alteração das propriedades químicas, físicas e biológicas em função do tempo;
- recipiente ou estruturas diversas (torre, composteira, baia, etc.) no qual o composto está sendo armazenado;
- precisão do método de análise.

Com base nesses dados, na natureza da matriz de resíduos originais e dos métodos analíticos empregados, deve-se buscar, através da amostragem, reduzir o máximo possível o efeito da heterogeneidade da matriz sobre a variabilidade do dado analítico.

A retirada das amostras foi feita com uma pá em diferentes pontos e profundidades da leira seguindo um esquema de amostragem ao acaso sobre um retículo bi ou tridimensional de malha cuja extensão é função das dimensões da leira (figura 4.6). A quantidade retirada era suficiente para se obter cerca de 2,5 kg de material.

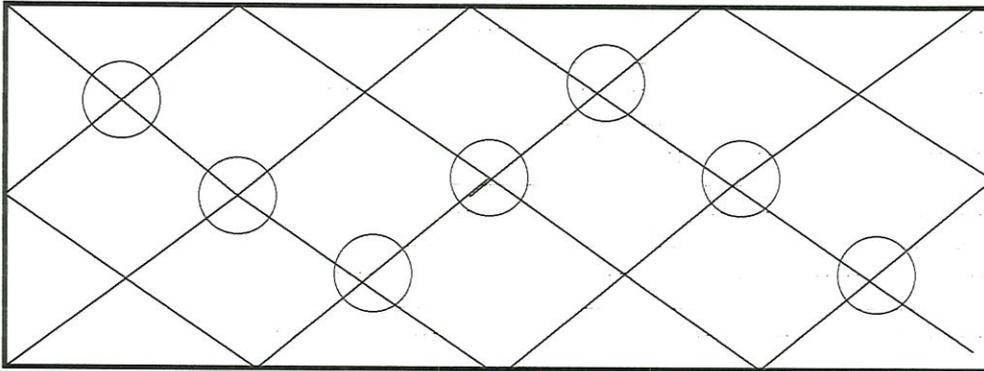


Figura 4.6 - Pontos de tomada de amostras em uma leira (vista superior).

Fonte : UNIVERSIDADE DE TORINO (s.d.)

4.6 Preparo das amostras para análise

Após a coleta, as amostras foram colocadas em sacos de polietileno e transportadas para os Laboratórios da USP - São Carlos onde eram submetidas a uma triagem para separação de materiais inertes grosseiros. Esses materiais eram formados por tampas de garrafas, plásticos, pedaços de pano, pedaços de metal, pedregulhos, que conseguiam passar pela triagem na Usina.

Após essa etapa, as amostras eram colocadas em bandejas previamente taradas e levadas ao forno a 50° C durante toda a noite tomando-se o cuidado para não ultrapassar essa temperatura para que não ocorram alterações químicas, principalmente, nas substâncias protéicas solúveis em água. Segundo KIEHL (1980), a secagem é realizada com as seguintes finalidades: aquecendo-se a amostra cessam os processos fermentativos que porventura possam ocorrer, alterando a composição do composto; a amostra assim aquecida apresenta-se seca, facilitando a separação manual e mais meticulosa de materiais inertes, como pedacinhos de metais, vidros, pedrinhas, etc. que não seriam decompostos quando levados ao solo. Esta secagem tem por finalidade colocar a amostra em condições de se proceder a análise granulométrica e de se efetuar a moagem. A moagem foi feita em um moinho de facas onde foi usado um filtro para passagem dos materiais finos. A secagem não remove toda a água e nem é essa a intenção; o propósito das operações de secagem, separação de inertes e moagem é tão somente o de melhorar a amostra para a análise, sem contudo melhorar os resultados analíticos a serem obtidos, uma vez que a umidade será considerada no cálculo final. O cálculo da umidade na secagem a 50° C está mostrado pela equação (4.1).

$$U_1 = \frac{P_I - P_F}{P_I} \times 100 \quad (4.1)$$

Em que:

U_1 : Teor de umidade a 50°C (%);

P_I : Peso da amostra (g);

P_F : Peso da amostra após secagem (g).

Logo após a moagem, o material foi passado por uma peneira de 0,5 mm de abertura com o intuito de deixar o material a ser analisado bem fino para se facilitar as operações analíticas.

4.7 Determinações de parâmetros convencionais

Depois de tratadas, as amostras foram encaminhadas para a etapa de análises. As análises estavam divididas em dois grupos: Amostra original e Amostra dos colóides. O grupo dos colóides foi a denominação dada para as amostras que foram obtidas a partir da amostra bruta, com a finalidade de se obter um controle da humificação. Para os dois grupos foram feitas as mesmas análises de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Química de Oxigênio teórica (DQO_T), Matéria Volátil (MV), Carbono Total (C - obtido por calcinação), Carbono Total* (C* - por medição de teor de Carbono), Carbono Orgânico Total (COT), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). Além dessas análises, foram feitas também análises de pH e Umidade do composto. A figura 4.7 ilustra os passos dados para as determinações.

4.7.1 Umidade

Para analisar a umidade foi seguido o método usualmente usado de secagem em estufa na temperatura de 105 - 110°C até peso constante. Foi feito a análise com cadinhos previamente tarados onde se colocava aproximadamente 2g da amostra em cada cadinho. A análise foram feitas em triplicata. Ao final da análise, somou-se o teor de umidade calculado na secagem a 50°C para calcular a umidade total.

$$U_2 = \frac{P_1 - P_F}{P_1} \times 100 \quad (4.2)$$

$$U_T = U_1 + U_2 \quad (4.3)$$

Em que:

U_2 : Teor de umidade a 105°C (%);

P_1 : Peso da amostra (g);

P_F : Peso da amostra após secagem (g);

U_T : Teor de umidade total (%).

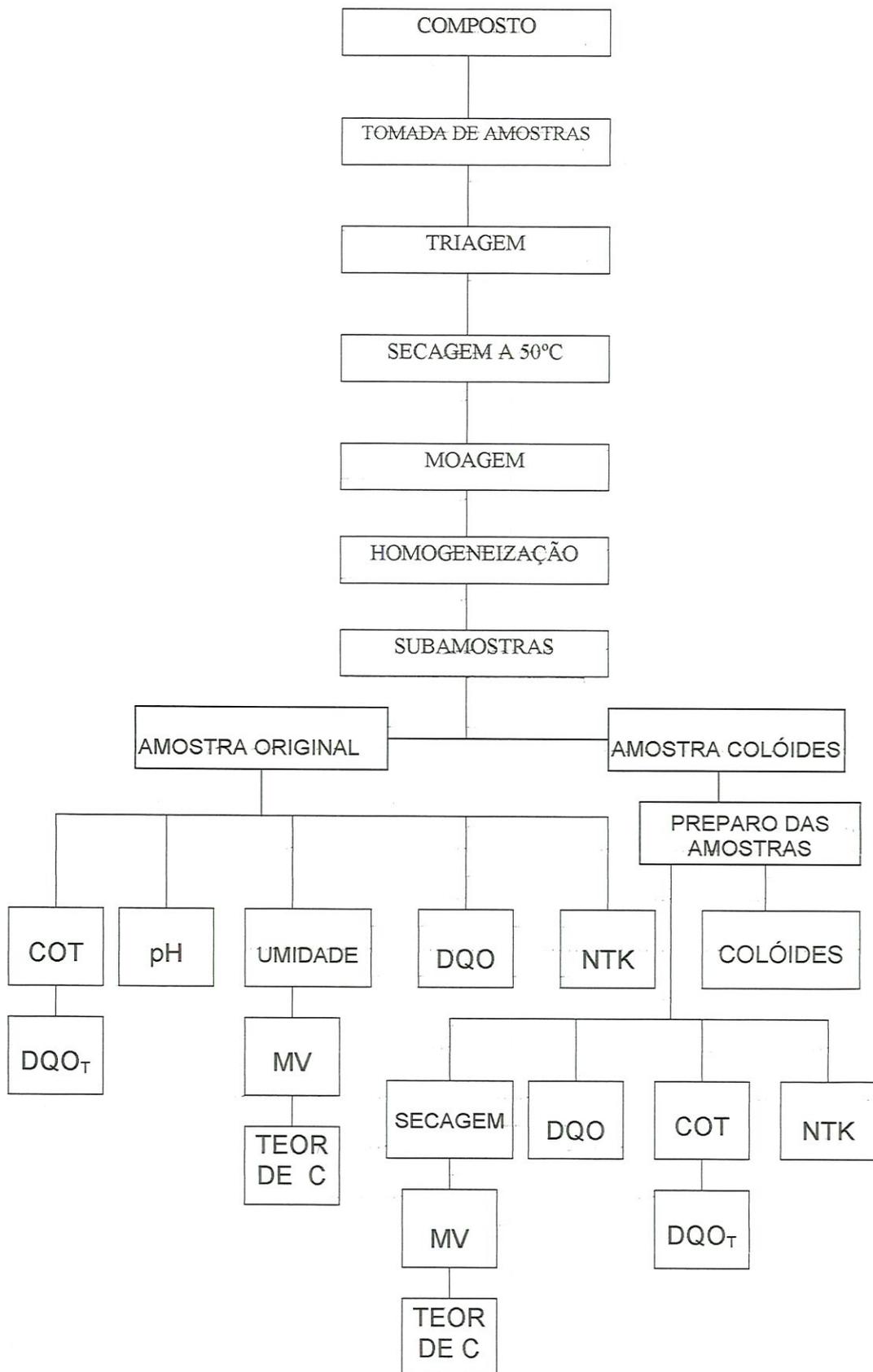


Figura 4.7 Fluxograma das etapas do monitoramento

4.7.2 pH

Para a análise do pH foi seguida a metodologia proposta por RICHARD (1996):

Colocar a amostra para secar em estufa 105 - 110°C por 24 horas;

Pesar 5 gramas da amostra em um becker;

Adicionar 25 ml de água destilada;

Misturar vigorosamente por 5 segundos e deixar descansar por 10 minutos.

Após essas etapas o pH foi lido com a ajuda de um potenciômetro calibrado.

4.8 Análises e determinações da amostra original

Após feitas as análises de pH e Umidade total, a amostra era submetida a análises de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Matéria Volátil (MV), Carbono Total (C), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). As amostras também eram submetidas as determinações de Carbono Orgânico Total (COT), Demanda Química de Oxigênio teórica (DQO_T), Carbono Total* (C*).

4.8.1 Demanda Química de Oxigênio

Para a determinação de Demanda Química de Oxigênio (DQO) foi seguida a metodologia citada por GOMES (1989), com adaptações, onde a massa foi seca em estufa a 105°C por 24 h; depois disso macerou-se a massa seca, pesou-se 1g. Após a pesagem adicionou-se 5 ml de água destilada e acidificou-se com 20 ml de ácido sulfúrico concentrado e foi utilizado um bastão de vidro até a reação esfriar. Colocou-se em um balão volumétrico de 250 ml e completou-se o volume com água destilada(o que

deu uma concentração de 4g/l). A adaptação da metodologia citada foi a não filtração da amostra, pois entendeu-se que a parte sólida continha matéria oxidável e poderia interferir no resultado da DQO.

Após essas etapas, que foram feitas em triplicata, foi seguida a metodologia de digestão de amostras líquidas descrita no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA, 1995) para determinação de DQO em refluxo fechado na qual se colocou uma alíquota da amostra, sem filtração, de 2,5 ml em tubos de cultura aqueceu-se a amostra durante duas horas em digestor HACH. Após resfriamento os tubos foram levados para leitura em espectrofotômetro da marca Hach modelo DR - 2000 onde a leitura foi executada a 620 nm.

O Standard Methods cita que o método de análise de DQO em refluxo aberto consome mais reagentes que o método de refluxo fechado. Porém, o refluxo fechado exige maior homogeneização de amostras contendo sólidos suspensos para se obter resultados reproduzíveis. Foi escolhido o método de refluxo fechado que demanda menor tempo e é mais simples para se realizar, além do que um dos objetivos do trabalho era padronizar os resultados em mg/g e não em mg/l. A transformação de mg/l para mg/g está mostrada na equação (4.4).

$$\text{mg/g} = \frac{A \times B}{g_{\text{amostra}}} \quad (4.4)$$

em que:

A: concentração do parâmetro na solução digerida (mg/l);

B: volume final da solução digerida (l);

g_{amostra} : peso da amostra seca utilizada na digestão (g).

4.8.2 Matéria Volátil

Para determinar a Matéria Volátil (MV) foi utilizado o método usualmente usado de se colocar a amostra na mufla e aquecer até, aproximadamente, 600°C por duas horas. Foi colocado 1 g de amostra em cadinho previamente tarado para tal. Após o aquecimento o cadinho foi colocado em dessecador para resfriamento e depois foi medido a massa restante. O cálculo é mostrado pela equação (4.5).

$$MV = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 1000 \quad (4.5)$$

em que:

MV : Teor de Matéria Volátil (mg/g);

P_i : Peso inicial da amostra (g);

P_f : Peso final da amostra após a calcinação (g).

4.8.3 Carbono Total

Para calcular o valor estimado de Carbono Total (C), foi seguido uma metodologia, citada por diversos autores, tais como JIMENEZ e GARCIA (1989), KIEHL (1985), RICHARD (1996a), concebida na Nova Zelândia na década de 60, que é mostrada pela equação (4.6):

$$C = \frac{MV}{1,8} \quad (4.6)$$

em que:

C = Carbono total (mg/g);

MV = Matéria Volátil (mg/g).

4.8.4 Carbono Total* e Carbono Orgânico Total (COT)

Para a determinação do Carbono total* por outro método (C*) foi utilizado um Analisador de Carbono Orgânico TOC - 5000 da SHIMADZU, usualmente utilizado para determinação de carbono em amostras de águas residuárias, equipado com módulo de amostrador de sólidos SSM - 5000 C devidamente calibrado. O módulo permitia que o analisador, específico para amostras líquidas, pudesse ser utilizado para determinações de amostras sólidas. A calibração era feita com amostras de glicose (para determinar a curva do Carbono total) e Bicarbonato de Sódio (para determinar a curva de Carbono inorgânico - CI). O analisador calculava o teor de Carbono em tempo médio de 5 minutos para Carbono total e Carbono inorgânico. Por diferença achava-se o valor do Carbono orgânico. Aproveitou-se também para anotar os valores de Carbono Total (C*) para futuras comparações com o outro método citado neste capítulo. A equação (4.7) ilustra o método.

$$\text{COT} = \text{C}^* - \text{CI} \quad (4.7)$$

em que:

COT : Carbono orgânico total (mg/g);

C* : Carbono total (mg/g);

CI : Carbono inorgânico (mg/g).

4.8.5 Demanda Química de Oxigênio teórica

Para a determinação do valor teórico de DQO (DQO_T), foi seguido o método sugerido por LOSSIN apud KIEHL* (1979) onde o autor cita que o fundamento do cálculo baseia-se no fato de que na compostagem a matéria orgânica é oxidada pelos microrganismos formando gás carbônico, água e calor, como produtos primários de seus metabolismos. O cálculo pretende

* LOSSIN, R.D. (1971). *Compost Studies. Disposing of animal wastes. Measurement of Chemical Oxygen Demand of Compost.* Compost Science, nº12 (2), pp. 31-32.

medir a oxidação biológica ocorrida no composto pela determinação da oxidação química em laboratório. O cálculo é mostrado na equação (4.8).

$$DQO_T = COT \times 26,66 \quad (4.8)$$

em que:

DQO_T : Valor de DQO teórica (mg/g)

COT : Teor de Carbono Orgânico (%)

4.8.6 Nitrogênio Total Kjeldahl

Para o cálculo do Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) foi seguida a metodologia de análise de solo proposta por CAMARGO et al. (1996). A análise de NTK nos fornece os valores do Nitrogênio Orgânico e do Nitrogênio Amoniacal, não revelando, portanto, outros tipos como o Nitrato e Nitrito.

- PROCEDIMENTO DA DIGESTÃO

- no tubo digestor colocar:

- a) 1 g de sedimento seco a 35°C ou temperatura ambiente *;
- b) 0,3 g da mistura: em almofariz colocar 100 g de sulfato de potássio ou sódio e 10 g de sulfato de cobre (5H₂O), misturar intimamente;
- c) 5 ml de água destilada;
- d) 15 ml de ácido sulfúrico concentrado.

- digerir até que cesse a produção de fumos e fique claro;

- esperar esfriar.

- PROCEDIMENTO DA DESTILAÇÃO

- colocar em um erlenmeyer 50 ml de ácido bórico e 4 gotas do indicador;

- no destilador, acrescentar 50 ml de água destilada e 85 ml de NaOH a 32%;

* muita matéria orgânica, usar menos que 1 g;

menos que 0,3% de carbono, usar mais que 1 g.

- destilar por 4 min até volume aproximado de 100 ml (o primeiro tempo de 5 min).

- PROCEDIMENTO DA TITULAÇÃO

titular com ácido clorídrico 0,2 N ou ácido sulfúrico 0,112 N até sumir a cor azul.

- INDICADOR DE COR

- dissolver 0,5 g de verde de bromocresol e 0,1 g de vermelho de metila em 100 ml de álcool etílico ou etanol;

- ajustar o pH desta solução com soluções diluídas de NaOH ou HCl de forma que a sua coloração fique púrpura ou azul.

- PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

O procedimento de cálculo está explicitado na equação (4.9)

$$NTK = \frac{\text{Vacido} \times N_A \times 0,014}{\text{massa da amostra}} \times 100 \quad (4.9)$$

em que:

NTK : Teor de NTK na amostra (%)

Vacido : Volume do ácido gasto na titulação (ml)

N_A : Normalidade do ácido (Normal)

OBS.: Para que os resultados fossem sempre expressos em mg/g, e não em percentagem, os valores das análises de NTK foram multiplicados por 10.

- COMO TESTAR O INDICADOR

- colocar 50 ml de ácido bórico;

- 2 gotas do indicador;



- 3 gotas de hidróxido de amônio 10%;
- titular normalmente.

4.9 Análises da amostra de colóides

KIEHL (1993) apresenta uma tentativa de determinação dos colóides que se baseia no método da pipeta, empregado para determinação do teor do colóide argila em amostras de terra. Tem por princípio a separação da fração coloidal da não coloidal do composto.

O autor cita que análises químicas geralmente só determinam os ácidos húmicos e fúlvicos, não determinando ou não especificando os demais componentes do húmus. O método sugerido determina a fração orgânica coloidal total, nela estando implicitamente incluída húmica, ácido húmico, ácido fúlvico, ácido himantomelânico, ácido apocrênico, ulmina, que têm influência nas propriedades químicas e físico-químicas; não somente os ácidos húmicos e fúlvicos.

O método consistiu no seguinte: partindo-se de uma amostra de composto (amostra original), colocou-se 20g do material em um becker de 1 litro. Juntou-se 50 ml de álcool (para favorecer a posterior absorção de água no material seco) agitando a amostra com o auxílio de um bastonete de vidro. Juntou-se 400ml de água e adicionou-se hidróxido de sódio 0,5N até obter reação alcalina com indicador fenolftaleína. Levou-se o becker para uma placa aquecedora até a ebulição; com o bastonete de vidro agitava-se a solução e, retirou-se algumas gotas para reagir com o indicador. Pela ação mecânica da ebulição em água e ação química da soda, o indicador não estava dando reação alcalina, pois os colóides orgânicos (que são ácidos) estavam em dispersão no líquido, reagindo com a soda e baixando o pH. Neste caso colocou-se mais Hidróxido e continuou-se a ebulição, repetindo as operações de indicador e hidróxido até que o indicador deu

reação alcalina que foi sinal que acabou a dispersão dos colóides na solução.

Após esta etapa, desligou-se a placa, e esperou a solução, que foi denominada de extrato (e), esfriar e passou-se todo o conteúdo do becker para uma proveta de 1000ml, agitou-se o conteúdo e pegou-se uma pipeta e introduziu-se no meio da proveta e tomou-se alíquotas 50ml da solução e colocou-se em cadinhos previamente tarados. Levou-se os cadinhos para a estufa até dar peso constante, pesou-se, reservou-se alguns cadinhos para as mesmas determinações do grupo da amostra original e os outros cadinhos foram para a mufla para calcinar, esfriar e pesar. O cálculo dos colóides é mostrado na equação (4.10).

$$P_c = P_1 - P_2 \quad (4.10)$$

em que:

P_c : peso de colóides na amostra (g);

P_1 : peso da amostra após estufa (g);

P_2 : peso da amostra após calcinação (g).

Para estimar a quantidade de colóides em relação a concentração da solução analisada (extrato), partiu-se do cálculo do teor de sólidos contido no cadinho (P_1) e do teor de colóides (P_c). A alíquota de 50 ml continha uma quantidade P_1 de sólidos dissolvidos e uma quantidade P_c de colóides. Assim, em 1g de extrato, a quantidade de colóides pôde ser determinada pela Equação (4.11).

$$g(e) = \frac{P_c}{P_1} g(c) \quad (4.11)$$

em que:

$g(e)$: peso de colóides na amostra dissolvida por g de extrato (g).

A concentração total de sólidos (dissolvidos e não dissolvidos) no extrato era de 20g/l, o que equivale a 1g/50ml. Se todos os sólidos fossem dissolvidos durante a análise, após secagem na estufa, o valor de P_1 seria equivalente a 1g. Como a quantidade de colóides encontrada na alíquota com concentração de 1g/50ml foi denominada de P_C , então 1g de amostra original contém P_C gramas de colóides.

$$1g(a) = P_C g(c) \quad (4.12)$$

ou ainda:

$$g(c) = \frac{1}{P_C} g(a) \quad (4.13)$$

relacionando as Equações (4.11) e (4.13), tem-se:

$$g(e) = \frac{P_C}{P_1} \times \frac{1}{P_C} g(a) \quad (4.14)$$

ou ainda:

$$g(e) = \frac{1}{P_1} g(a) \quad (4.15)$$

Ou seja, para que os resultados sejam expressos em gramas por gramas de amostra, para os cálculos de amostras de colóides, fez-se necessário dividir os resultados das análises por P_1 .

Optou-se por utilizar o método proposto por KIEHL (1993), por ser um método mais simples, mais rápido e menos oneroso que os métodos de

avaliação dos ácidos húmicos citados na literatura onde, basicamente, a extração é feita com $K_4P_2O_7$ sob atmosfera de nitrogênio, depois os ácidos são separados por acidificação até pH 2 com H_2SO_4 e então são lidos em espectro de raios Ultravioleta.

A análises realizadas para os colóides foram as mesmas que foram realizadas para a amostra original, guardando as devidas concentrações. Foi feita uma retirada da massa contida nos cadinhos reservados e essa massa foi dividida para serem analisadas pelos diversos parâmetros já citados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão contidos os resultados das pesquisas acompanhados pela discussão dos mesmos comparando com resultados de outros pesquisadores.

Como citado no capítulo 4 deste trabalho, as amostras foram divididas em dois grupos: amostra original e amostra dos colóides. Na amostra original, que foram as amostras secas a 50°C, moídas e homogêneas, foram feitas as análises de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Química de Oxigênio teórica (DQO_T), Matéria Volátil (MV), Carbono Total (C), Carbono Total* (C*), Carbono Orgânico Total (COT), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). Para a amostra dos colóides, que são as amostras submetidas a um tratamento para extração dos colóides, segundo metodologia proposta por KIEHL (1993), foram feitas também as mesmas análises. Após a obtenção dos resultados, foram feitas avaliações do comportamento dos parâmetros, bem como correlações entre os resultados das análises de cada grupo para se obter informações a respeito do processo de bioestabilização da leira de compostagem.

5.1 Monitoramento da Leira de Compostagem

A leira estudada foi monitorada através de medidas de Umidade Total, pH e Temperatura, com a finalidade de se acompanhar o processo de degradação. A tabela 5.1 mostra os valores encontrados durante a etapa de monitoramento da leira durante todo o processo de compostagem.

Tabela 5.1 - Valores encontrados durante o monitoramento do processo de compostagem

DIAS	Umidade Total (%)	pH	Temperatura Ambiente (°C)	Temperatura leira (°C)
0	60,3	6,7	31,1	26,9
7	54,2	5,9	28,6	49,2
15	42,2	7,0	28,0	57,6
21	22,5	7,1	29,0	40,9
35	29,4	8,1	29,0	43,6
42	19,9	8,4	33,7	33,2
49	21,7	8,3	32,0	40,0
57	19,1	8,3	29,9	38,9
62	16,0	8,2	33,5	39,2
77	35,7	8,2	29,5	38,3
84	38,3	8,2	28,0	37,7
92	25,1	8,2	27,5	36,4
105	27,04	8,3	29,4	31,3
120	26,4	8,0	32,1	32,4
127	25,2	8,1	29,2	29,3

Na etapa de monitoramento não houve problemas graves, exceto com a temperatura da leira que, no 42º dia, sofreu um decréscimo devido ao fato de a umidade do ar ser muito baixa na região, e também devido ao calor intenso na época do experimento, provocando um declínio da atividade microbiana e, conseqüentemente, na temperatura da leira. Para contornar o problema, foi colocado um toldo sobre a leira para que o sol não incidisse diretamente sobre a mesma, tendo o cuidado de deixar espaços abertos nas laterais para facilitar a entrada de ar, e também foi acrescentado água à leira para corrigir a umidade quando necessário.

5.1.1 Temperatura

Após o monitoramento da temperatura da leira, com o auxílio do equipamento já descrito no capítulo anterior, obteve-se a variação da temperatura em função do tempo, que pode ser observado pela figura 5.1.

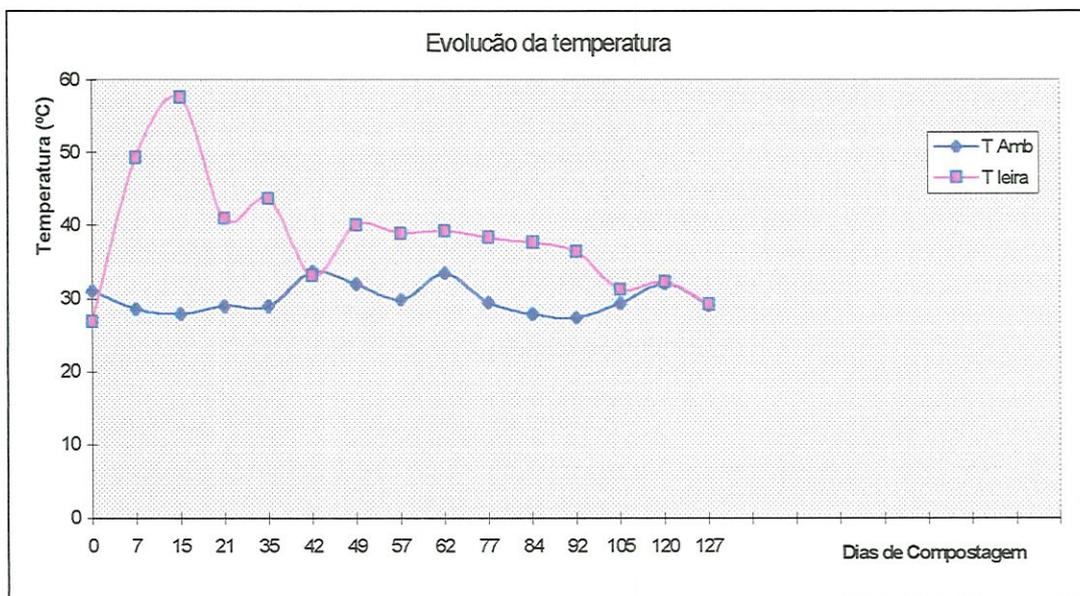


Figura 5.1 - Evolução da temperatura na leira

Como pode ser observado, a temperatura da leira foi, inicialmente, de 27°C e, a partir dos primeiros dias, a temperatura evoluiu até o valor de 57°C, atingindo a fase termofílica e, algum tempo depois, declinou até a

temperatura mesofílica onde, segundo KIEHL (1985), ocorre a fase de bioestabilização. Houve um declínio na temperatura no 42º dia devido a perda de umidade, que logo foi corrigida tendo a temperatura voltado ao nível normal. Após o 100º dia notou-se um declínio da temperatura até se chegar a temperatura ambiente. Essa fase é a denominada, ainda segundo o autor, de humificação.

A curva da temperatura ambiente manteve-se em torno dos 30°C ao longo do processo de compostagem. Ocorreram alguns picos, como no caso do 42º dia, em que a temperatura ambiente alcançou o valor de 33,7°C, sendo uma das causas do decréscimo do teor de umidade, além da umidade ambiente, que é baixa nessa época do ano.

5.1.2 Umidade

Quanto a umidade, a literatura cita que a umidade ideal inicial é em torno de 60% e decresce lentamente até chegar a aproximadamente 30%. O gráfico da figura 5.2 mostra a evolução da umidade total no decorrer do processo de compostagem.

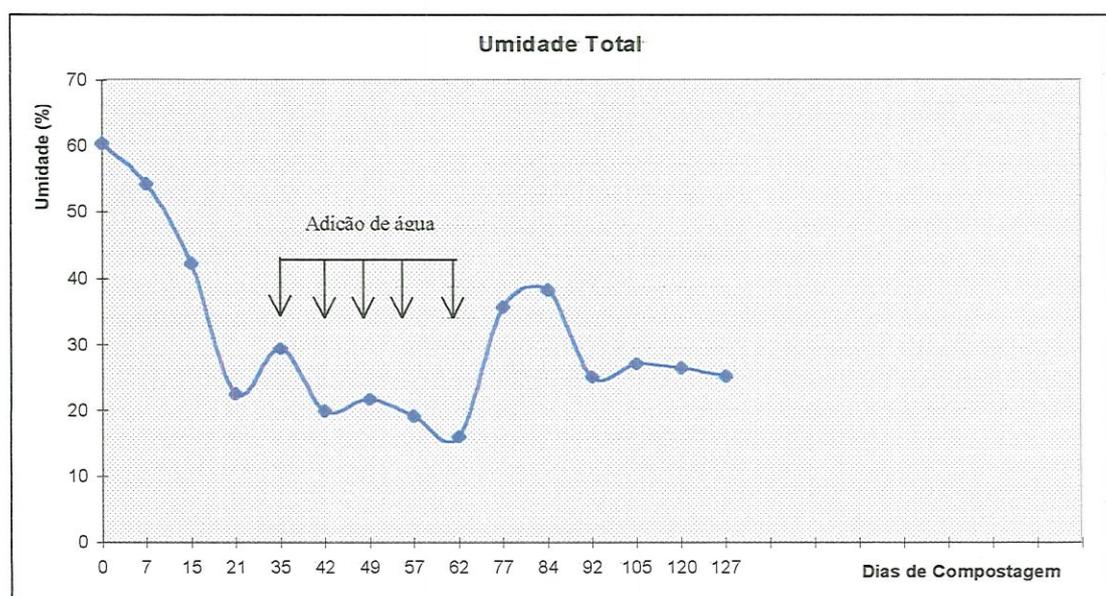


Figura 5.2 - Evolução da Umidade total na leira.

A Umidade inicial, no presente trabalho, foi de 60% e foi declinando lentamente até o 15º dia, quando sofreu um decréscimo brusco, permanecendo em volta de 20%. A partir deste período foi adicionado água à leira durante os dias 21, 35, 42, 49, 57 e 62 para que a umidade atingisse um valor adequado para o processo de degradação. Ainda assim, devido a umidade do ambiente ser baixa, a umidade da leira continuou declinando até atingir um mínimo de 16% no 62º dia. Após esse dia, a umidade aumentou até o valor de 35,% e, a partir desse dia, foi decrescendo lentamente até uma umidade final de 25%.

Como já exposto antes, a umidade do ar pode ter afetado a umidade da massa. Isso pode ser notado através do gráfico entre o 21º e o 62º dia, mas parece não ter afetado o processo de degradação pois a temperatura não acompanhou o declínio da umidade. Esse dado ressalta, nitidamente, que não se pode medir o processo de compostagem por um só parâmetro. Quando a temperatura declinou, referente ao 42º dia, não se poderia dizer que o processo já estava estabilizado, pois o número de dias era insuficiente para se ocorrer uma estabilização completa, e quando a umidade declinou sensivelmente não se poderia dizer que o processo já tinha terminado pois a temperatura acusava que ainda existia atividade biológica na leira.

5.1.3 pH

Outro parâmetro para acompanhamento do processo de monitoramento da leira foi a determinação do pH. O gráfico da figura 5.3, ilustra a evolução do pH durante a compostagem.

No início da compostagem o pH, que era de 6,7, decresceu até o valor de 5,9 já no 7º dia. Após o 7º dia, o pH evoluiu até o pico de 8,4 no 42º dia e depois permaneceu constante no valor de 8,3 até o final do estudo.

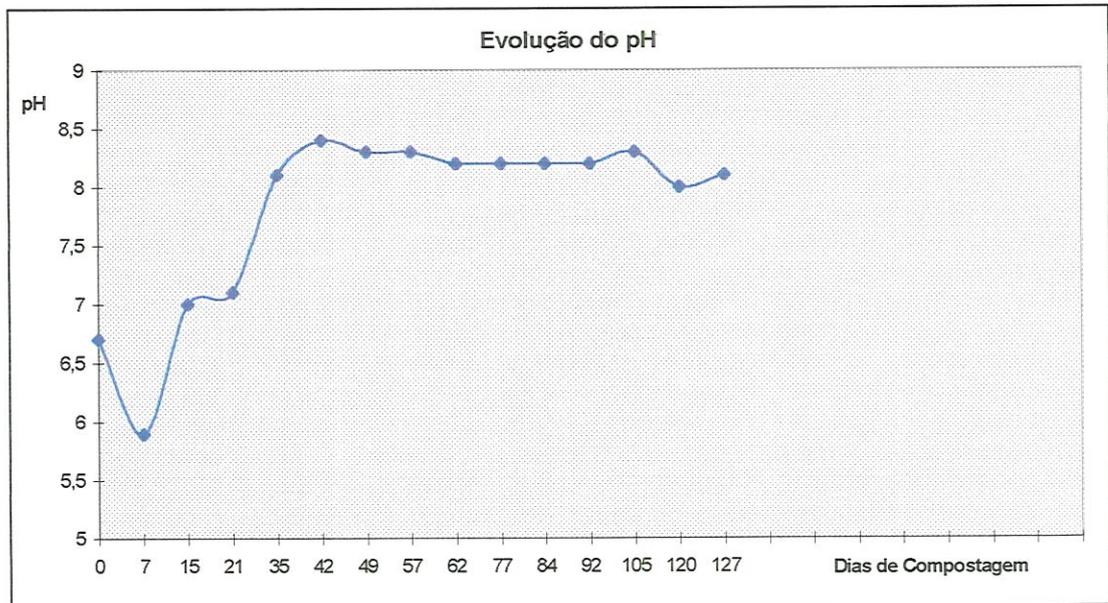


Figura 5.3 - Evolução do pH na compostagem

DIAZ (1993) cita que enquanto o pH na digestão anaeróbia geralmente se situa em uma faixa pequena ou seja, qualquer variação de pH pode acarretar problemas no processo, a faixa de pH na compostagem atinge uma faixa tão ampla que dificilmente acontecerão problemas se houver variação de pH no processo. O autor cita que na compostagem o pH cai no início do processo até 5,0 por causa da formação de ácidos orgânicos. Os ácidos servem como substratos para as sucessivas populações microbianas. Após essa etapa o pH alcança níveis altos como 8,5. HAUG (1993) cita que a compostagem tem a habilidade única em neutralizar altos e baixos valores de pH durante o processo. Isso se deve a formação de um ácido fraco (CO_2) e uma base fraca (NH_3), portanto é muito difícil encontrar um processo de compostagem que fuja da faixa citada pela literatura já comentada (entre 5,0 e 8,5).

Para auxiliar no processo de monitoramento da leira, RICHARD (1996b) apresenta uma tabela onde cita alguns problemas que podem ocorrer durante o monitoramento. Na tabela 5.2 são citados alguns problemas, suas causas e suas soluções.

Tabela 5.2 - Problemas durante o monitoramento da leira

PROBLEMA	CAUSA	SOLUÇÃO
Odor anaeróbio	Excesso de umidade Leira muito larga Temperatura maior que 60°C Compactação	Revirar a leira Tornar a leira menor Revirar a leira Revirar ou diminuir o tamanho
Temperatura baixa	Leira muito pequena Umidade insuficiente Aeração pobre	Aumentar o tamanho Adicionar água durante o reviramento Revirar a leira
Vetores Ratos Mosquitos	Presença de comida Presença de água parada	Remover a comida, ou usar ratoeiras Eliminar a água
Combustão espontânea	Temperatura excessiva Umidade inadequada Centelhas, cigarros, etc.	Diminuir a leira Adicionar água Manter potenciais fontes de fogo longe da leira

FONTE: RICHARD (1996b)

Além de se medir o pH, a temperatura e a umidade na leira de compostagem, outros parâmetros, apesar de subjetivos, podem ser determinados para avaliar a compostagem, tais como: odor, cor e redução de volume.

O composto, quando estabilizado, fica com um cheiro característico de "terra molhada", sua cor torna-se escura e o seu volume reduz sensivelmente. A redução de volume, e a cor podem ser observadas ao se comparar o aspecto da leira no início e no final do processo de compostagem. A figura 5.4 ilustra este fato.



Figura 5.4 - Aspecto da leira no início e no final da compostagem

5.2 Monitoramento da leira por outros parâmetros

Neste item apresenta-se o resultado das análises e determinações feitas para a amostra original referentes a Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Química de Oxigênio teórica (DQO_T), Matéria Volátil (MV), Carbono Total (C), Carbono Total* (C*), Carbono Orgânico Total (COT), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). A tabela 5.3 descreve os valores encontrados nas análises efetuadas para a original.

Tabela 5.3 - Parâmetros da amostra original analisados

DIAS (mg/g)	MV (mg/g)	C (mg/g)	C* (mg/g)	N (mg/g)	C/N	DQO (mg/g)	COT (mg/g)	DQOt (mg/g)
0	279,1	155,0	117,5	6,6	23,5	564	115,2	306
7	290,2	161,2	160,7	9,6	16,8	449	158,4	421
15	267,4	148,6	155,9	9,0	16,5	455	153,6	408
21	292,0	162,0	203,5	13,0	12,5	437	201,2	535
35	281,0	156,0	160,6	13,0	12,0	496	158,3	421
42	242,0	134,0	140,5	14,0	9,6	357	138,2	368
49	267,0	148,0	151,3	13,0	11,4	380	149,0	396
57	230,9	128,0	156,1	13,0	9,8	376	153,8	409
62	282,4	157,0	143,2	13,0	12,1	347	140,9	375
77	240,2	133,4	138,5	11,0	12,1	351	136,2	362
84	257,3	142,9	132,3	12,6	11,3	397	130,0	346
92	238,7	132,6	135,7	11,9	11,1	356	133,4	355
105	231,3	128,0	111,1	11,3	11,3	342	108,8	289
120	260,1	145,0	111,9	11,7	12,4	343	109,6	291
127	239,9	133,2	123,2	11,1	12,0	345	120,9	321

5.2.1 DQO e DQO_T

Para as amostras de DQO, que foram realizadas pelo método, adaptado, proposto por GOMES (1989) seguido pelo sistema de refluxo fechado citado no capítulo 4 deste trabalho. A figura 5.5 abaixo demonstra o comportamento da DQO da amostra original durante o processo.

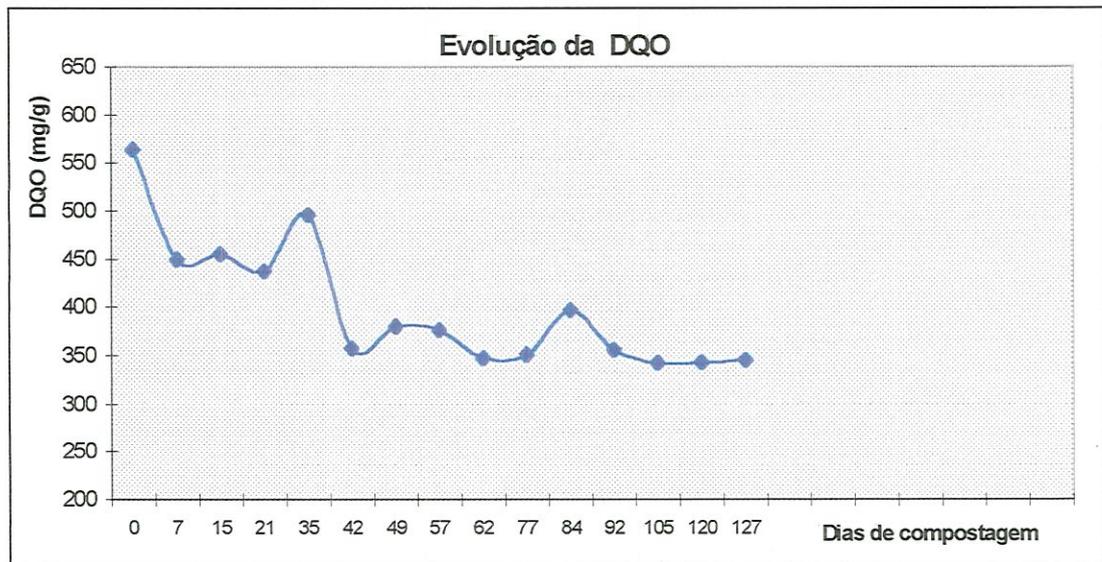


Figura 5.5 - Evolução da DQO na compostagem

O valor inicial da DQO foi de 564 mg/g, que foi decrescendo lentamente até o valor de 345mg/g no final do processo como previsto pela literatura, havendo um pico, não esperado, de 496mg/g no 35º dia do processo.

A literatura cita que o valor inicial da DQO no início da compostagem situa-se em torno de 900mg/g, e de 700mg/g no final da compostagem. JIMENEZ e GARCIA (1989) e HAUG (1993) citam que os parâmetros da compostagem variam de acordo com a região tipo do composto e hábitos da população. Ainda citam que a maioria dos parâmetros são aplicados ao processo e alguns somente ao produto, ou seja ao substrato que está em estudo. Daí a dificuldade de se estabelecer

métodos universais quando somente o produto é considerado. O problema pode ser minimizado quando vários métodos ou critérios são considerados de maneira complementar.

Em trabalho publicado por VILLANI e PEREIRA NETO (1993) os autores encontraram um valor de DQO inicial de 796 mg/g e valores finais entre 390 e 455 mg/g, a depender da leira estudada. Isto reflete que os valores de DQO encontrados, para a análise proposta por GOMES(1989) seguida por análise em refluxo fechado, são coerentes com os valores encontrados por esses autores.

A variação da DQO_T , calculado a partir do Carbono orgânico (COT) pela equação (4.7) é mostrado na figura 5.6, onde se pode visualizar esse comportamento, juntamente com a DQO medida na prática.

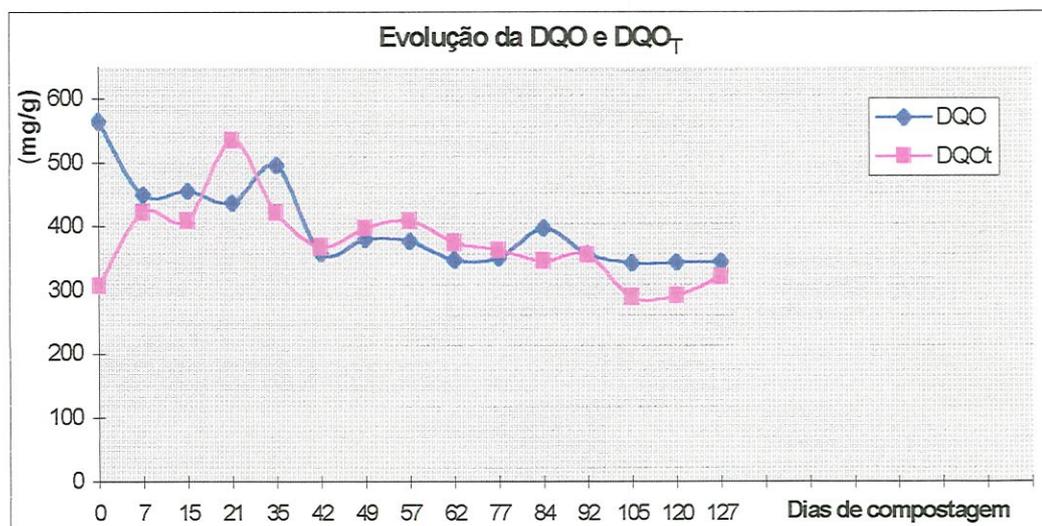


Figura 5.6 - Evolução da DQO e QDO_T na compostagem

Como se pode notar, a variação da DQO_T acompanhou, de forma aproximada, a variação da DQO medida na prática, tendo alteração mais significativa na 1ª análise. Esse gráfico indica que o métodos para se

calculara DQO e DQO_T podem levar a resultados interessantes neste aspecto.

5.2.2 Carbono Total

A verificação da variação do Carbono total foi acompanhada por dois métodos. O primeiro método determinava o Carbono total através da calcinação da amostra para determinação da matéria volátil, e depois dividiu-se o valor da MV por 1,8 (esse método é chamado de Método da Nova Zelândia, devido ao fato que os primeiros pesquisadores do método eram originários desse país). O segundo método consistia em colocar a amostra em um analisador de TOC (Total Organic Carbon) e calcular o valor do carbono total. A figura 5.7 mostra a evolução do Carbono, pelo dois métodos, durante a compostagem a leira estudada.

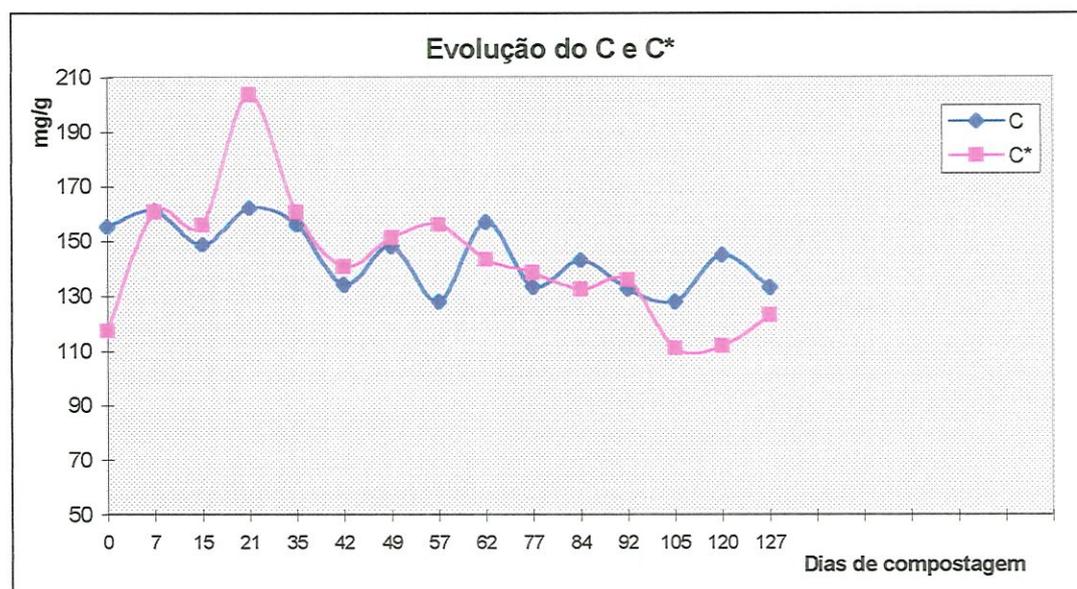


Figura 5.7 - Evolução do C e C* durante a compostagem

Como pode ser observado, as curvas da variação do teor de carbono sofrem um decréscimo ao longo do tempo, apesar de não apresentarem uma igual variação do comportamento entre os dois métodos, ressaltando uma discrepância maior no dia 0 e no dia 21.

BECKERS et al. (1986) citam que a determinação da matéria volátil e, por sua vez, a determinação de C em um composto de lixo urbano não leva em conta alguns produtos como alcóois e ácidos orgânicos de baixo peso molecular que volatilizam na etapa de aquecimento a 105-110°C para descartar a umidade. HAUG (1993) cita que o método da Nova Zelândia tem uma imprecisão que varia entre 2 e 10%, segundo os autores da pesquisa. Esses fatos podem fornecer suporte para a pequena variação entre os dois métodos, além de que para cada método usa-se uma amostra e, como se trata de amostra sólida, nem sempre há uma homogeneidade das amostras.

5.2.3 Nitrogênio

Outro método analisado foi o de determinação do nitrogênio a partir de metodologia proposta para solos proposta por CAMARGO et al. (1996). O gráfico da figura 5.8 detalha o comportamento do nitrogênio durante a compostagem.

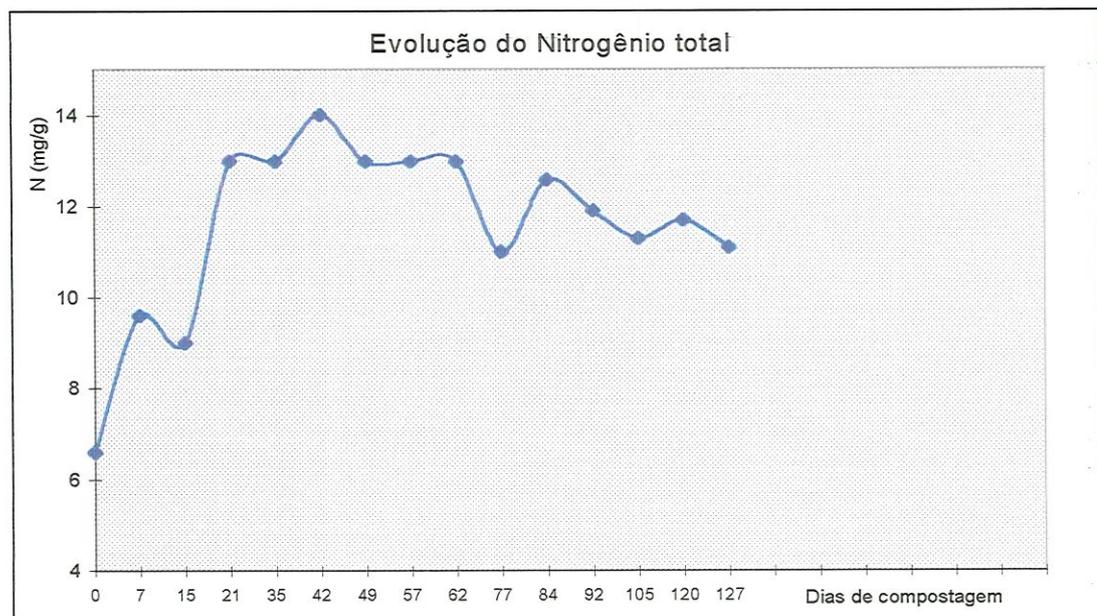


Figura 5.8 - Evlução do nitrogênio durante a compostagem

O gráfico da figura 5.8 mostra que o comportamento do nitrogênio, que apresentou um valor inicial de 6,6 mg/g, tende a um aumento com o decorrer do tempo, começando a se estabilizar e declinar por volta do 84º dia do processo. O aumento é em termos percentuais em relação a amostra analisada (como visto no capítulo Materiais e Métodos, a metodologia proposta por CAMARGO et al. (1996) expressa o resultado em percentagem, ou g/100g. Para transformar em mg/g, foi feita uma multiplicação por 10), refletindo que o teor de nitrogênio permanece constante na amostra, enquanto que o teor de carbono diminui. Já o declínio mostra uma falha na análise de nitrogênio pelo método Kjeldahl, que só consegue medir o nitrogênio orgânico e o amoniacal.

Segundo KIEHL (1985), o nitrogênio presente no substrato encontra-se, principalmente, na forma de nitrogênio orgânico. Com o decorrer do processo, o nitrogênio passa para a forma amoniacal e, finalmente, para a forma de nitrito e nitrato. Como o método de Kjeldahl não consegue medir o teor de nitrito e nitrato, então o método mostra uma tendência de queda no teor de nitrogênio.

É importante verificar que no gráfico que representa o comportamento do teor de Carbono (figura 5.7) a estabilização também começa a ocorrer nesse período, o que indica que o método proposto para avaliar a biodegradação está apresentando resultados bastante satisfatórios e que o processo de compostagem, a partir desse dia está começando a se estabilizar. A figura 5.9 ilustra o comportamento dos parâmetros Carbono e Nitrogênio ao longo do processo de compostagem.

Pode-se perceber que teor de Carbono decresce ao longo do tempo, enquanto que o teor de Nitrogênio decresce. É importante notar que, a partir do 84º dia, quando os teores de Carbono e Nitrogênio começam a se estabilizar, as duas curvas têm o mesmo comportamento.

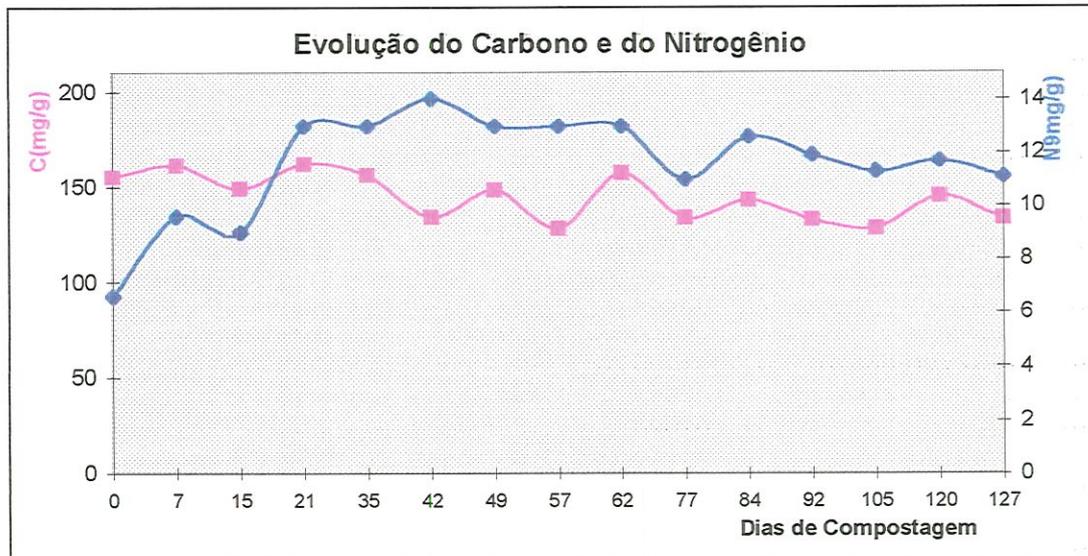


Figura 5.9 - Evolução de C e N durante a compostagem.

5.2.4 Relação C/N

Outro parâmetro importante para se analisar é a relação C/N, como mostra a figura 5.10. Como pode ser notado, a relação C/N inicial foi de 23,5, e foi decrescendo lentamente até atingir uma relação final C/N de 12.

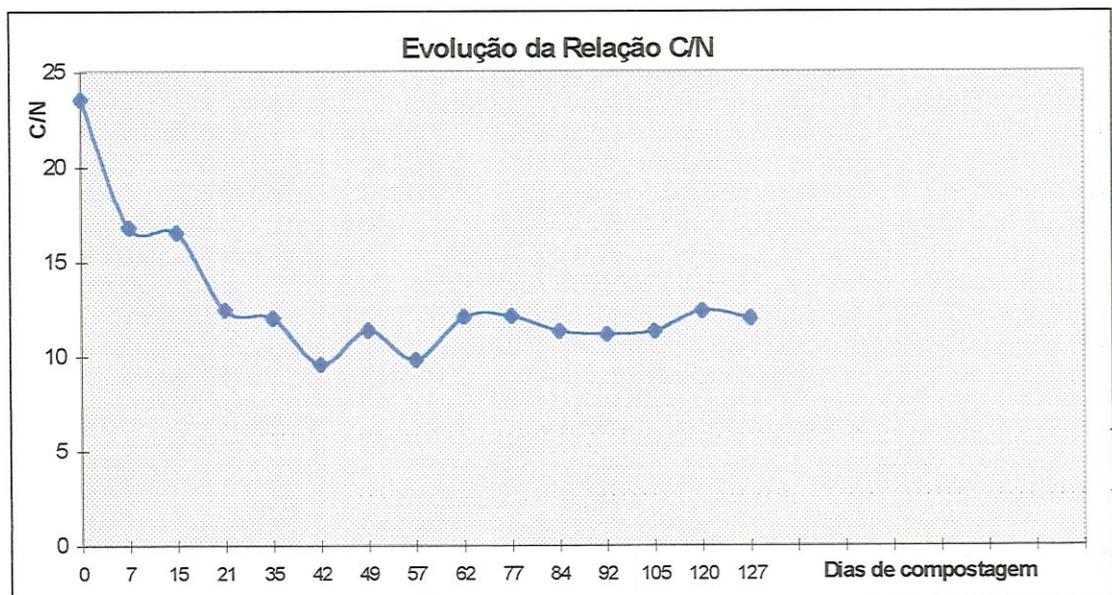
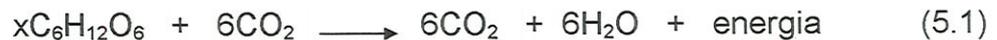


Figura 5.10 - Evolução da relação C/N na compostagem.

Na compostagem o carbono representa o material energético necessário para a ativação do processo de síntese celular e o nitrogênio, o material básico para a constituição da matéria celular sintética. Embora KIEHL(1983) cite que a relação inicial correta seja de 26 a 35, HAUG(1993) cita que uma relação inicial entre 15 e 30 já favorece ao crescimento microbiano. Para entender o significado de a relação C/N ser de 30, o autor cita algumas reações químicas descritas a seguir:

Partindo-se do amido ou substrato celulósico como fonte de energia e sendo a glicose o monômero base, a reação energética pode ser descrita como:



Essa reação produz energia livre que a célula absorve para síntese de nova massa microbiana. Assumindo uma formulação média de $C_5H_7O_2N$ para a célula e amônia como fonte de nitrogênio celular, a reação de síntese é a seguinte:

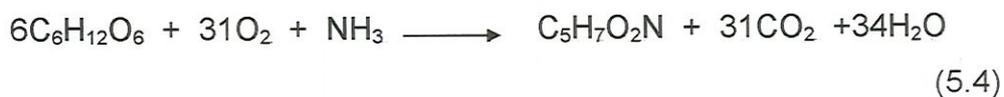


A máxima produção celular é limitada pela termodinâmica a 0,4g células/g glicose. O autor assume a faixa de 0,1 a 0,2 como típica para compostagem ou substratos relativamente degradáveis. Usando 0,1g de células, para cada g de glicose consumido, como coeficiente de produção celular, os moles de energia requerida da reação energética (eq. 5.1) por mol da reação de síntese (eq.5.2), e assumindo um Peso Molecular de 180 para a glicose e de 113 para a célula, podem ser determinados como se segue:

$$\frac{1}{x(180)} = \frac{0,1}{113} \quad (5.3)$$

$$x = 6,3 \text{ moles/mol, ou aproximadamente } 6$$

Multiplicando a reação energética (eq. 5.1) por 6 e adicionando a reação de síntese (eq. 5.2), a reação geral será a seguinte:



Pela equação (5.4), 36 moles de Carbono reagiram com 1 mol de Nitrogênio. Assim a relação C/N requerida é de $36(12)/1(14)$, o que resulta, aproximadamente, 30. Para um crescimento celular de 0,2 a relação cairia pela metade, ou seja, 15.

Além disso, JIMENEZ e GARCIA (1989) citam que, devido as diferenças de composto para composto, não se pode dizer, com certeza, que uma relação final C/N igual a 20 não indique um composto bioestabilizado ou que uma relação C/N de 10 significa um composto bioestabilizado. O autor cita que a melhor maneira de se utilizar o parâmetro C/N é fazer uma relação entre o C/N final e o C/N inicial. Uma relação C/N final / C/N inicial menor que 0,70 para um composto com mais de 120 dias é uma medida de degradação satisfatória.

Diante do exposto, pode-se dizer que a relação C/N atendeu as expectativas, significando que as metodologias usadas foram satisfatórias, pois os valores encontrados para relação C/N inicial foi de 23,5, enquanto que a relação C/N final foi de 12.

Pelo que foi descrito neste item (5.2), pode-se afirmar que as análises efetuadas para se medir a bioestabilização, pelos métodos propostos já comentados - Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Química de Oxigênio teórica (DQO_T), Matéria Volátil (MV), Carbono Total

(C), Carbono Total* (C*), Carbono Orgânico Total (COT), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) alcançaram resultados satisfatórios, visto que corresponderam com a literatura, e também os métodos diferentes realizados para medir o mesmo parâmetro (Carbono total* e Carbono total, DQO e DQO_T) apresentaram comportamentos interessantes.

5.3 Monitoramento da leira através das análises dos colóides

Os colóides foram determinados a partir da amostra original segundo metodologia proposta por KIEHL (1993), que consiste em se aquecer uma determinada quantidade de amostra original em uma solução contendo água e álcool. Com o aquecimento desprendiam-se ácidos orgânicos (colóides) que ficariam em movimento Browniano na solução. Após o aquecimento e resfriamento da solução, a mesma era transferida para uma proveta de 1000 ml onde era retirada uma alíquota com uma pipeta de 50ml. A essa alíquota foi dado o nome de extrato. Após a retirada da alíquota, essa nova amostra era colocada em estufa para secagem. Com a parte seca da amostra foram feitas as mesmas análises que foram feitas para a amostra original, sendo o cálculo dos colóides feito pela calcinação, o que corresponde ao teor de Matéria Volátil.

Após ter realizado a metodologia proposta por KIEHL (1993), foi feito um gráfico para analisar o comportamento dos colóides, supondo que estes tenderiam a crescer de acordo como tempo. (figura 5.11)

O gráfico mostrou que os colóides diminuíram ao longo do tempo, não se comportando como o esperado. Analisando melhor, verificou-se que o método aplicado pode não ter sido eficiente para calcular o teor de colóides, pois durante a retirada de alíquotas do extrato para secagem e calcinação, certamente foram, junto com os colóides no extrato, materiais

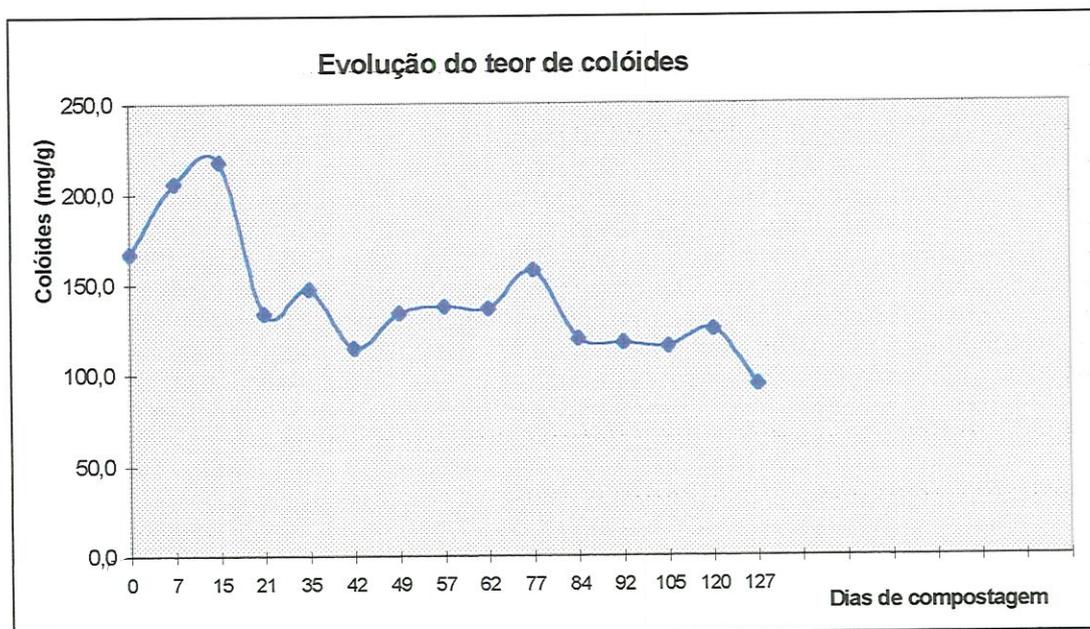


Figura 5.11 - Evolução do teor de colóides

suspensos e solúveis (não somente colóides) e que continham carbono em maior quantidade que os colóides, que foram liberados durante a calcinação. Como o teor de carbono em uma compostagem decresce com o tempo e, como o teor de carbono correspondente a matéria volátil contida no extrato seco era bem maior que o teor dos colóides, o resultado da calcinação da massa também decresceu, independente de o teor de colóides ter crescido ou não. A figura 5.12 ilustra melhor essa explicação.

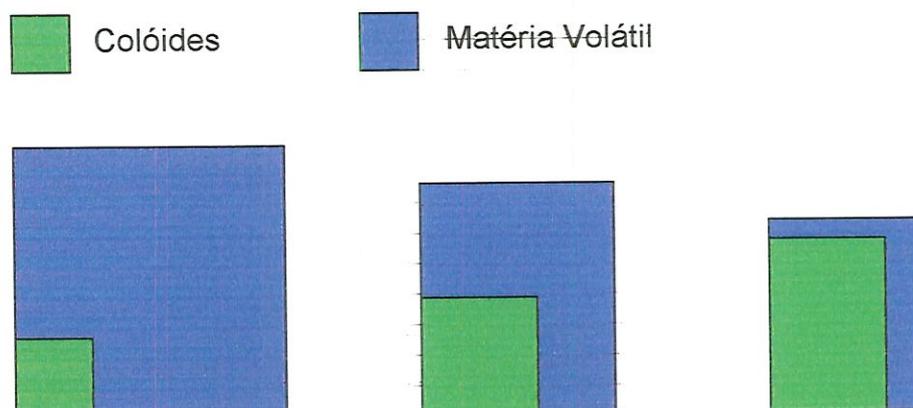


Figura 5.12 - Ilustração do decréscimo da Matéria volátil e do acréscimo do teor de colóides ao longo do tempo.

Foram realizadas também as mesmas análises para as amostras dos colóides que foram realizadas para a amostra original, supondo-se também um crescimento de seus valores ao longo do tempo, partindo-se do princípio que o teor de colóides cresceria. Esse crescimento não aconteceu, mostrando que o método de extração dos colóides parece não fornecer precisão. Entretanto, as análises subsequentes de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Carbono total (C) , Carbono total* (C*), Carbono Orgânico total (COT), Nitrogênio (N) e relação C/N serviram para acompanhamento e controle pelo fato de o extrato conter uma massa relativamente pura de matéria carbonácea, pois no ensaio, a alíquota era retirada do interior da pipeta, deixando os sólidos fixos e mais grosseiros na parte inferior, obtendo-se assim uma massa mais homogênea de material carbonáceo. No próximo item é mostrado o comportamento dos parâmetros analisados para os colóides.

A tabela 5.4 mostra os valores encontrados para todos os parâmetros analisados para a amostra dos colóides.

Tabela 5.4- Parâmetros analisados da amostra dos colóides.

DIAS	MV (mg/g)	C (mg/g)	C* (mg/g)	N (mg/g)	C/N	DQO (mg/g)	COT (mg/g)	DQOt (mg/g)
0	167,0	92,8	88,9	2,8	33,3	220	86,6	230
7	205,9	114,4	101,0	3,1	37,0	280	98,7	262
15	218,1	121,2	125,9	4,3	28,0	270	123,5	329
21	133,6	74,2	53,9	4,8	15,4	201	51,6	137
35	147,2	81,9	58,8	5,0	16,2	201	56,5	150
42	114,4	63,5	49,7	4,8	13,3	182	47,3	126
49	134,0	74,4	52,6	5,5	13,6	117	50,2	134
57	137,6	76,4	54,2	6,2	12,3	146	51,8	138
62	136,5	75,8	56,3	6,5	11,7	183	53,9	143
77	157,8	87,8	69,5	6,4	13,8	194	67,1	179
84	119,8	66,6	43,8	6,4	10,3	160	41,5	110
92	117,5	65,3	52,8	6,1	10,8	162	50,4	134
105	115,8	64,4	46,2	5,1	12,5	143	43,8	117
120	124,8	69,2	46,1	5,5	12,5	147	43,8	116
127	94,4	52,4	36,1	4,6	11,5	121	33,7	90

5.3.1 DQO e DQO_T

A figura 5.13 mostra a evolução da Demanda Química de Oxigênio (DQO e da Demanda Química de Oxigênio teórica (DQO_T)

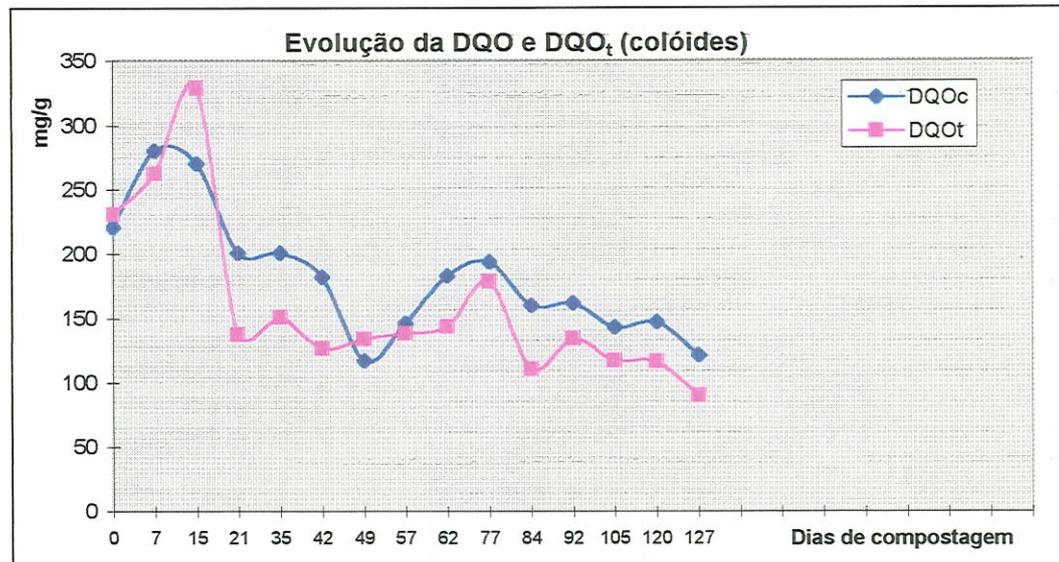


Figura 5.13 - Evolução da DQO e DQO_T no extrato.

A figura 5.13 mostra que os valores de DQO estão decrescendo com o tempo, demonstrando assim que o teor de matéria carbonácea está também decrescendo. Este fato reforça a idéia que a alíquota de 50ml que era retirada para se obter a massa contendo colóides (extrato) continha um teor de matéria carbonácea bem maior que o teor de colóides, a ponto de interferir no resultado. A figura mostra também que parece haver uma correlação entre a DQO medida e a DQO teórica. Excetuando-se dois pontos, pode-se notar que a DQO_T - que é medida através da medida do Carbono Orgânico Total (COT) - acompanha a DQO medida, sempre mantendo uma diferença próxima entre si, mostrando um acompanhamento satisfatório ao longo da curva.

5.3.2 Carbono total

Para a análise do teor de Carbono, feito pelos dois métodos já citados, os resultados são mostrados na figura 5.14 abaixo.

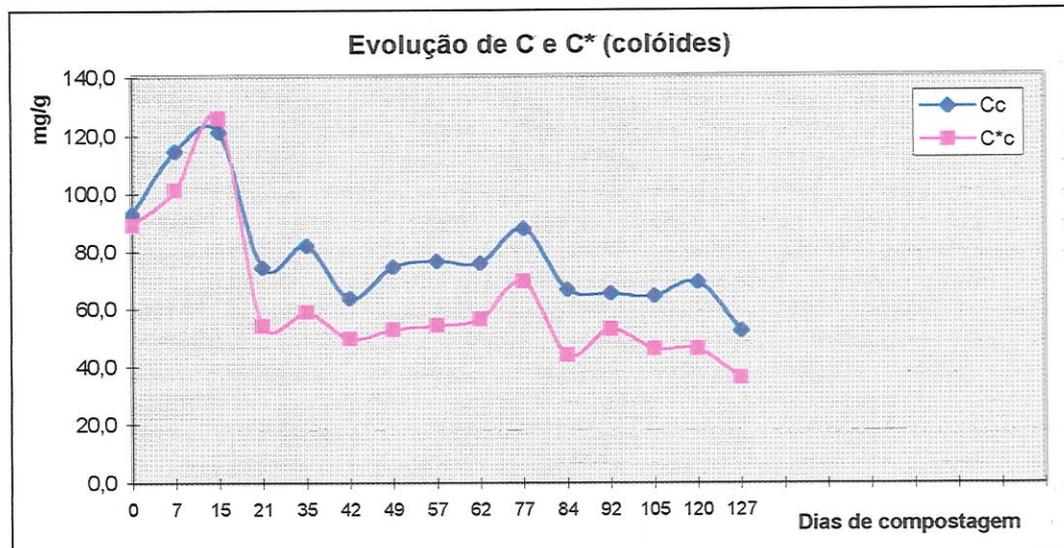


Figura 5.14 - Evolução de C e C* no extrato.

A figura 5.14 mostra que o teor de carbono total decresceu ao longo do tempo (com exceção das duas primeiras amostras). Mostra também uma boa correlação, tendo o valor de C* sempre menor, mas sempre em uma equidistância próxima durante a variação de C.

5.3.3 Nitrogênio

A curva de evolução do nitrogênio, para a amostra dos colóides, está representada na figura 5.15. Pelo gráfico da figura 5.15 pode-se observar que o teor de Nitrogênio cresceu ao longo do processo de compostagem, começou a ficar constante a partir do 62º dia e ocorreu um pequeno decréscimo durante as últimas 4 tomadas de amostra.

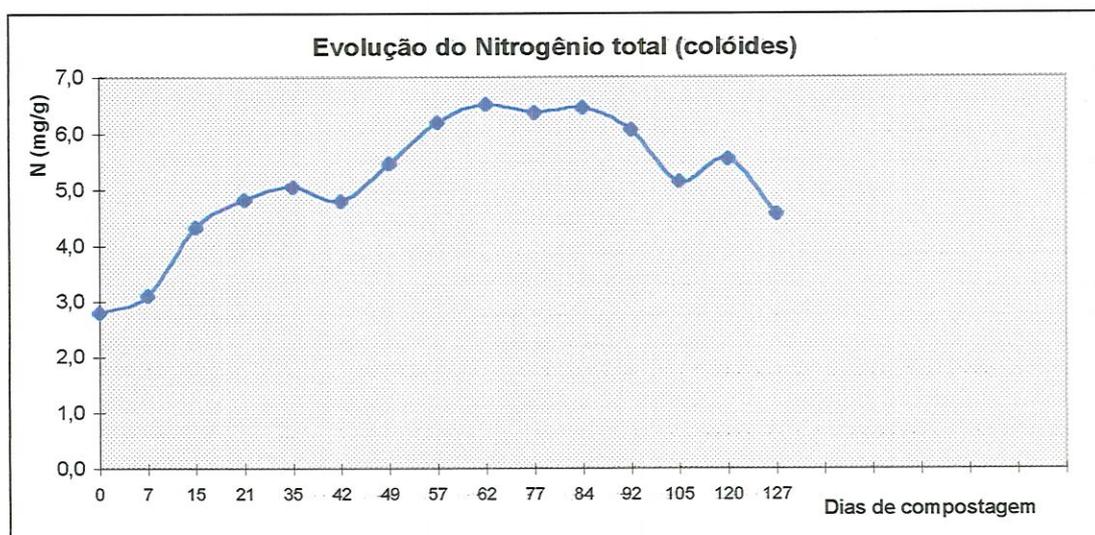


Figura 5.15 - Evolução do Nitrogênio no extrato.

Esse decréscimo deve-se, como já explicitado anteriormente, a formação de nitritos e nitratos durante a estabilização do processo de compostagem. Como os nitritos e os nitratos não são detectados pelo método de Kjeldahl, tem-se a falsa impressão que o teor de nitrogênio decresceu ao longo do tempo.

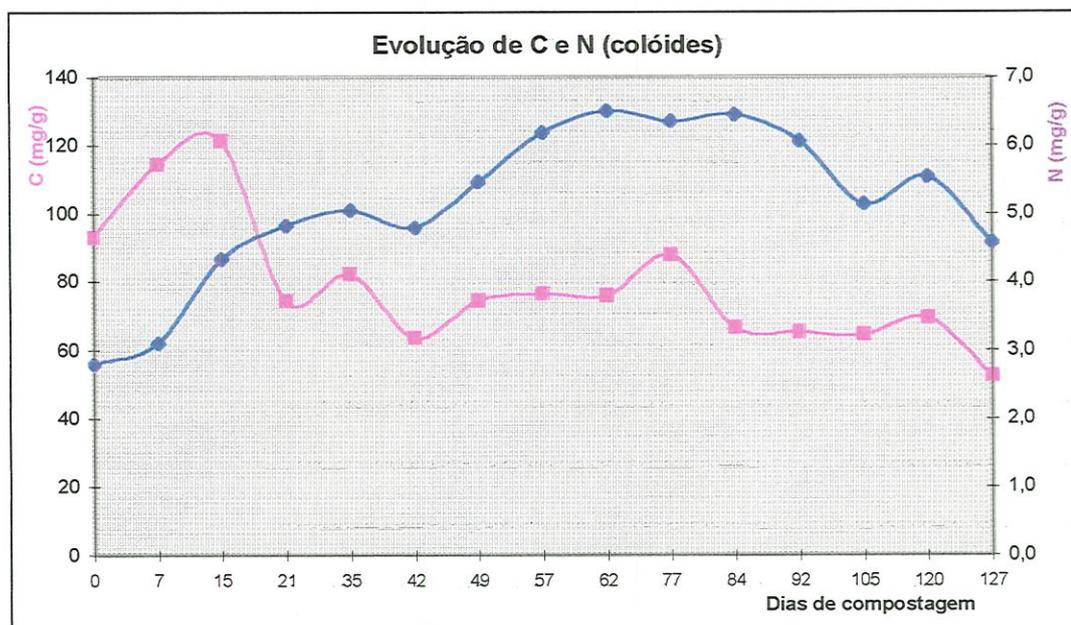


Figura 5.16 - Evolução do Carbono e do Nitrogênio no extrato.

Comparando os resultados da variação do teor de carbono e do teor de nitrogênio ao longo do tempo (figura 5.16), pode-se notar que as curvas de Nitrogênio e da curva de Carbono tiveram o mesmo comportamento que as curvas das análises da amostra original, significando assim que os métodos foram satisfatórios e reproduziram o comportamento das curvas de acordo com a literatura e significando, também que a amostra dos colóides tinha mais matéria carbonácea, e nitrogenada, do que colóides propriamente dito.

5.3.4 Relação C/N

O gráfico 5.17 ilustra o comportamento da relação C/N na amostra dos colóides. O gráfico mostra que a relação decresceu ao longo do tempo, com exceção das duas primeiras análises que não seguiram a tendência de queda, mas mesmo assim, o gráfico se comportou com o previsto pela literatura, realçando, mais uma vez, que a alíquota retirada para a análise dos colóides continha mais matéria carbonácea que o teor de colóides propriamente dito.

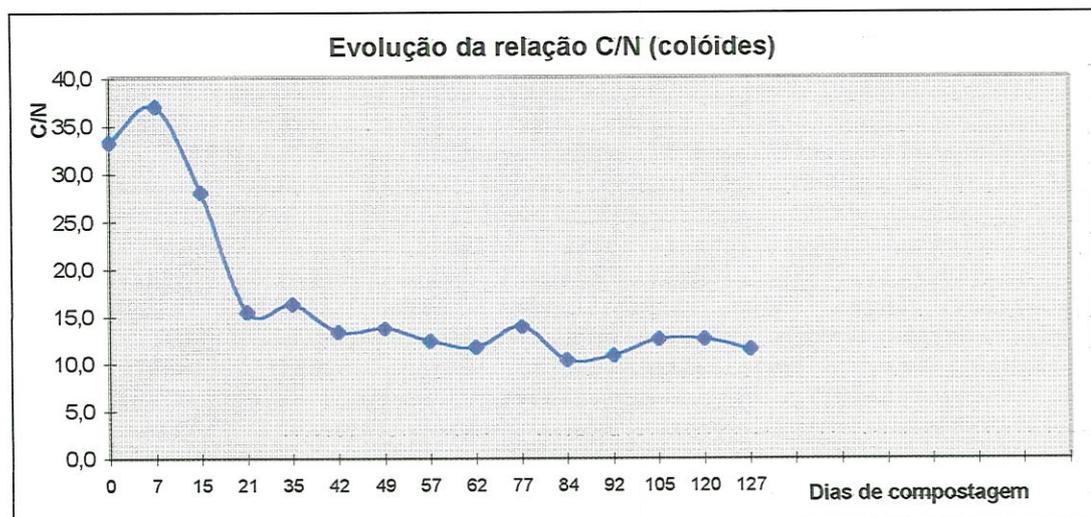


Figura 5.17 - Evolução da relação C/N no extrato.

Pelo exposto acima, verifica-se que a Metodologia proposta por KIEHL (1993) não se mostrou satisfatória, pois não alcançou o resultado esperado que era o aumento do teor de colóides ao longo do processo. Como já citado, acredita-se que o teor de matéria orgânica, que não colóides, era muito maior que o teor de colóides nas amostras pipetadas (extrato) resultando, assim, em gráficos semelhantes ao da amostra original, e de acordo com a literatura, reforçando, mais uma vez, que os métodos analíticos para se acompanhar o processo de biodegradação são satisfatórios.

5.4 Correlações

Como as análises mediam a degradação da matéria carbonácea, então foram feitas correlações para saber se as medidas correspondiam entre si. As figuras 5.18, 5.19 e 5.20 ilustram as correlações obtidas:

O gráfico da figura 5.18 mostra a correlação entre dois métodos diferentes para se calcular o teor de Carbono para a amostra original e para a amostra de colóides. Pelo exposto no gráfico, as medidas não se correlacionam entre si, no caso da amostra original, mas no caso da amostra de colóides a correlação mostrou-se muito boa, indicando que a não correlação, no caso da amostra original, deve ser tido devido a amostra ser heterogênea e não ao tipo de método.

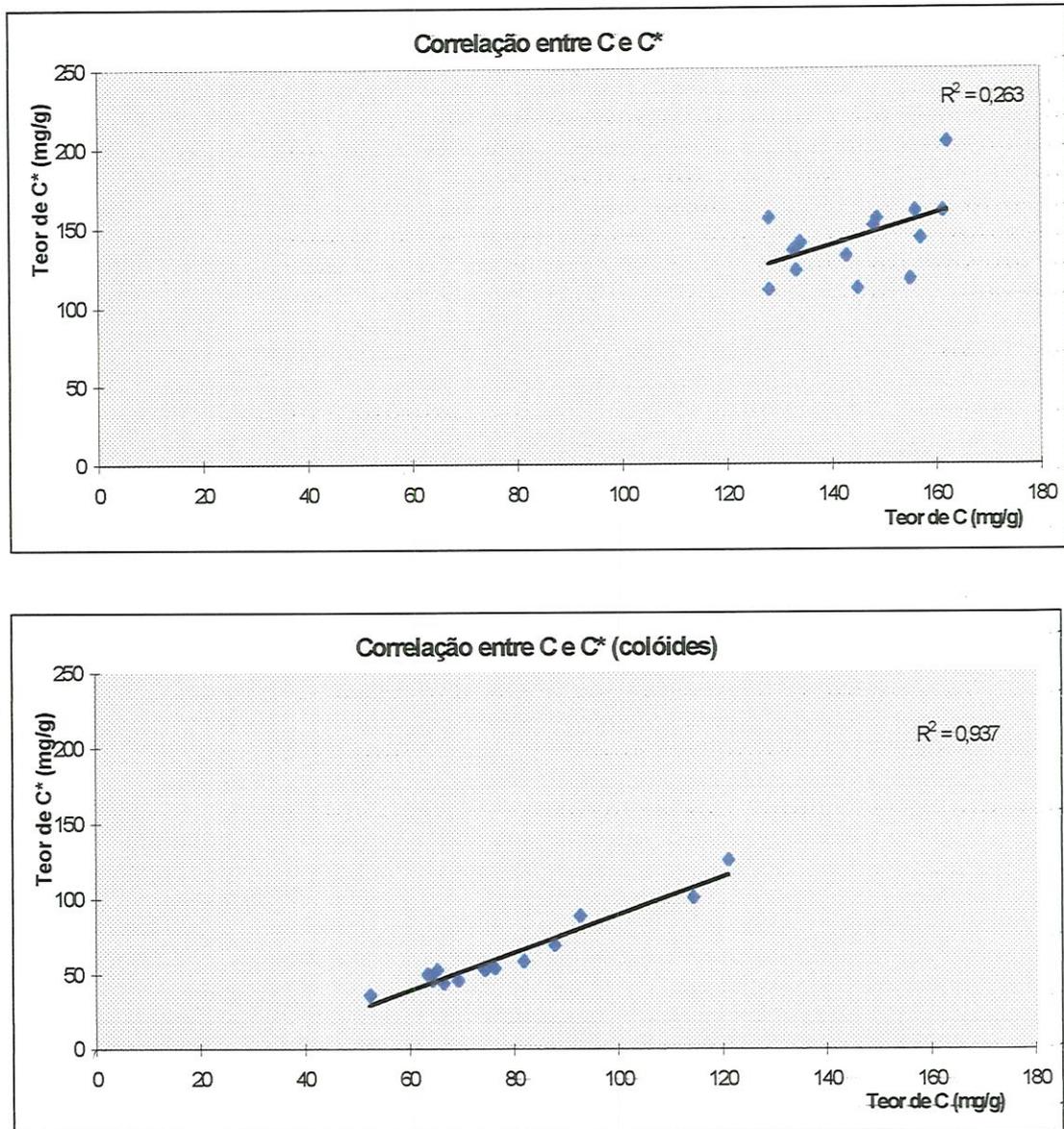


Figura 5.18 - Correlação entre métodos de determinação de Carbono na amostra original e Colóides

No caso as correlações entre Carbono Orgânico* (medido pelo analisador de TOC) e DQO apresentadas na figura 5.19, acontece o mesmo que na figura anterior: a correlação para a amostra original está muito baixa, enquanto que a correlação para a amostra dos colóides está boa, provando, mais uma vez, que a não correlação pode ser devido a amostra em si.

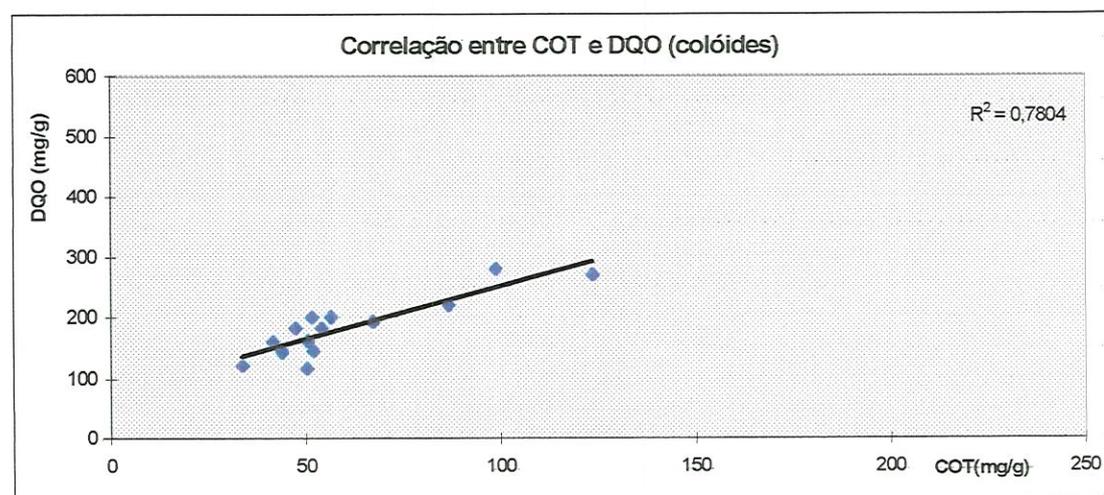
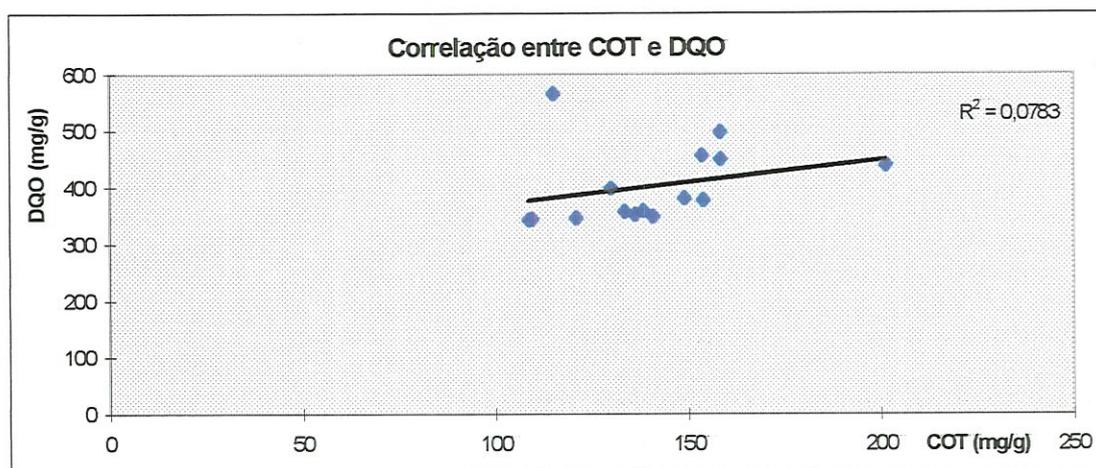


Figura 5.19 - Correlações entre Carbono Orgânico e DQO para amostra original e colóides.

A figura 5.20 mostra correlações entre a Matéria Volátil e a DQO, da amostra original e dos colóides, onde mais uma vez se mostra que a correlação das análises sobre a amostra original não são significativas e a correlação das análises da amostra de colóides alcança uma boa significação, mostrando, mais uma vez, o problema da heterogeneidade de amostras.

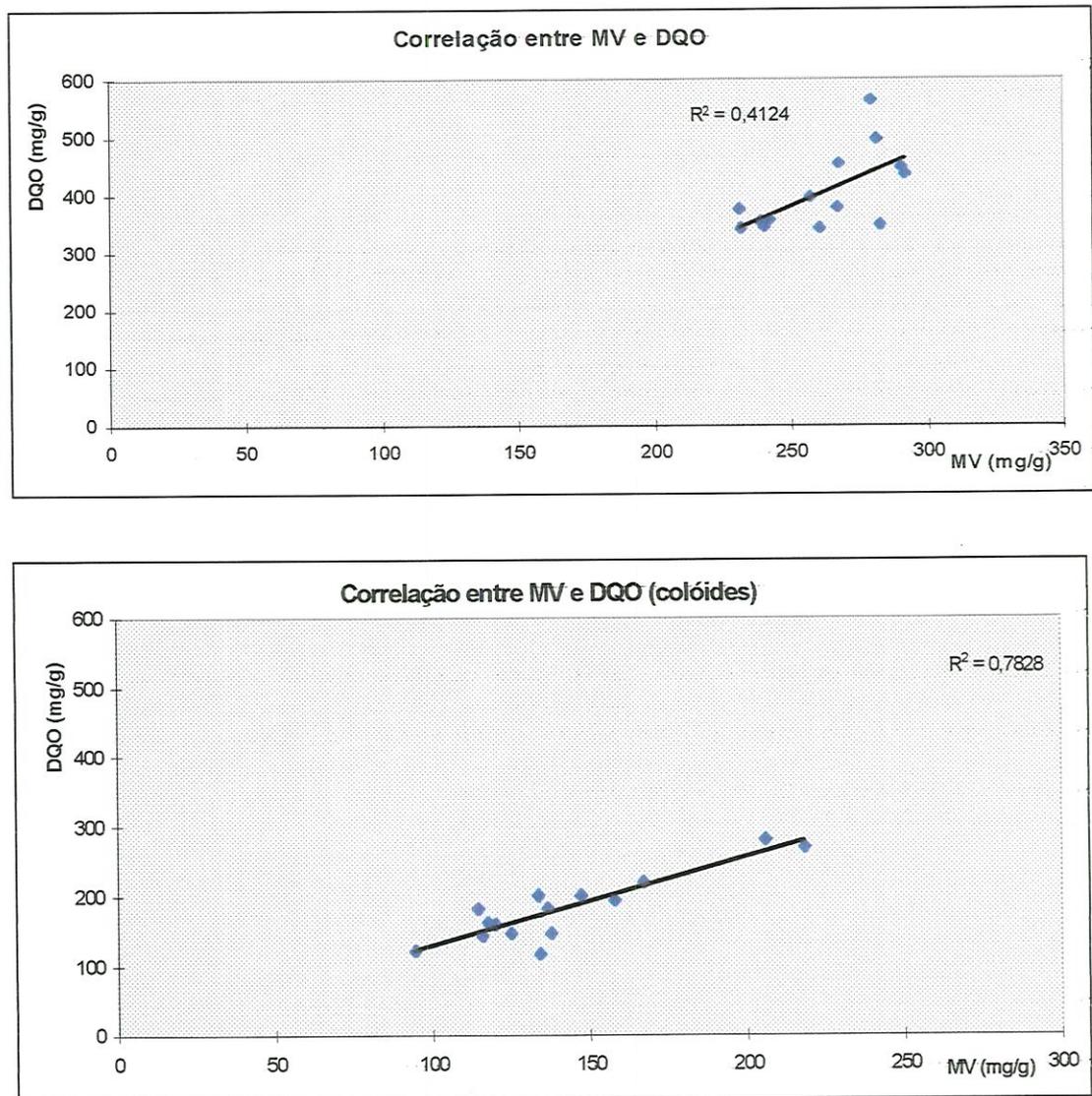


Figura 5.20 - Correlações entre Matéria Volátil e DQO para amostra original e colóides.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando-se os objetivos propostos aliados aos dados obtidos no decorrer deste trabalho, pode-se concluir que:

As metodologias propostas para se avaliar o comportamento do processo de bioestabilização do resíduo sólido domiciliar, por meio de análises em amostras sólidas, foram satisfatórias, pois forneceram resultados condizentes com a literatura;

Os parâmetros Demanda Química de Oxigênio (DQO), Carbono Orgânico Total (COT) e Matéria Volátil (MV), que são métodos alternativos para se medir a Matéria Orgânica, não apresentaram correlações entre si para análises da amostra original;

A metodologia para extração dos colóides parece não fornecer precisão, pois houve um decréscimo no teor dos mesmos em vez de ocorrer um acréscimo. Entretanto a aplicação desta metodologia faz com que as amostras sejam mais homogêneas e se conseguiu, com isso, obter melhores correlações entre os parâmetros analisados de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Carbono Orgânico Total (COT) e Matéria Volátil (MV) para essas amostras;

Como as correlações se mostraram satisfatórias para as amostras dos colóides, concluiu-se que a homogeneidade da amostra é um fator importante na obtenção de resultados significativos;

Recomendam-se adaptações no método de extração dos colóides, possibilitando maior rendimento do processo. Recomenda-se também proceder um número maior de coletas de amostras, visando, com isso, diminuir o efeito da heterogeneidade das amostras.

7. BIBLIOGRAFIA

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987).
NBR- 10.004 - Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1987).*NBR-10.007 – Amostragem de Resíduos: Procedimento*, Rio de Janeiro.

APHA (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19^a ed. American Public Health Association, New York.

BARBERIS e NAPPI (1996). *Evaluation of Composting Stability*. In: The Science of Composting - European Commission International Symposium, Blackie Academic & Professional, England, v.1, pp 175-183.

CAMARGO et al. (1996), *Métodos de Análises Química, Física e Mineralógica do Instituto Agrônomo de Campinas*, Instituto Agrônomo - Boletim Técnico 106, Campinas, out., 94p.

CALDERONI,S. (1997). *Os Bilhões Perdidos no lixo*. São Paulo, Humanitas/FFCHL/USP.

CASTRO, M.C.A.A. (1996). *Avaliação da Eficiência das Operações Unitárias de uma Usina de Compostagem e Reciclagem na Recuperação dos Materiais Recicláveis e na Transformação da Matéria Orgânica em*

- Composto*. São Carlos. 113p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CHEN et al. (1990). *New Approaches to compost maturity*. *Biocycle*, vol. 31, nº 12, pp. 64-68.
- CNDU - Conselho Nacional de Desenvolvimento Urbano (1979). *Limpeza Pública*. São Paulo, CETESB.
- CONSTRUFERT (1997). *Composto Orgânico*. Folheto Informativo.
- DIAZ, L.F. et al. (1993). *Composting and Recycling Municipal Solid Waste*. Boca Raton, Lewis Publishers.
- GOMES, L. P. (1989), *Estudo da Caracterização Física e da Biodegradabilidade dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterros Sanitários*, Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 159p., São Carlos, SP.
- HARADA, Y. e INOKO, A. (1980). *Relationship Between Cation-exchange and degree of Maturity of City Refuse Composts*. *Soil Science Plant Nutrition*, nº 26(3), pp. 353-362.
- HAUG, R.T (1991). *Measuring compost substrate degradability*. *Biocycle*, vol. 32, n. 01, pp. 56-62.
- HAUG, R.T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis, Boca Ratón.

- IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (1996). *Aspectos Econômicos da Gestão Integrada de Resíduos Sólidos*. Texto para discussão n.º 416. Maio, 26 pp.
- INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA
IPPUC (1981). *Aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos*. Curitiba, s. ed.
- JARDIM, N.S. et al. (1995). *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. São Paulo, IPT.
- JIMENEZ, E.I; GARCIA,V.P. (1991). *Composting of refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation exchange capacity*. Resources, Conservation and Recycling, nº6, pp.45-60.
- JIMENEZ, E.I; GARCIA,V.P. (1989). *Evaluation of City Refuse Compost maturity: A Review*. Biological Wastes, nº 27, pp. 115-142.
- KIEHL, E. J. (1985). *Fertilizantes Orgânicos*. São Paulo, Ceres.
- KIEHL, E. J. (1993). *Fertilizantes Organominerais*, 2. ed. Piracicaba, ed. do autor.
- KIEHL, E.J. (1979). *Metodologia da compostagem e ação fertilizante do composto de resíduos domiciliares*. ESALQ-USP, Piracicaba.
- KIEHL,E.J. (1980). *Análises de Composto*. Piracicaba, USP.
- LIMA, L.M.Q. (1995). *Lixo - Tratamento e Biorremediação*. 3. ed. São Paulo, Hemus.

-
- LOPEZ-REAL, J.M. (1996). *Composting of agricultural wastes*. In: The Science of Composting - European Commission International Symposium, Blackie Academic & Professional, England, v.1, pp 542-550.
- MASIANI e DOMEIZEL(1996). *Quality of Composts: Organic Matter Stabilization and Trace Metal Contamination*. In: The Science of Composting - European Commission International Symposium, Blackie Academic & Professional. Anais. England, v.1 , pp 185-193.
- PEREIRA NETO, J.T. (1996) *Composting: Experiences and Perspectives in Brazil*. In: European Commission International Symposium, Blackie Academic & Professional, 1996. Anais. England, v. 2, p 729-735.
- PEREIRA NETO, J. T. (1996). *Manual de Compostagem processo de baixo custo*. UNICEF. Belo Horizonte.
- PEREIRA NETO, J.T. (1989). *Conceitos Modernos de Compostagem*. Engenharia Sanitária, v.28, n.3, p. 104-09.
- PINTO, M.S. (1979). *A coleta e a disposição de lixo no Brasil*. Rio de Janeiro, FGV.
- POLPRASERT, C. (1989). *Organic Wastes Recycling*. London, Jonh Wiley & Sons Ltd.
- RICHARD, T.L. (1992). *Municipal Solid Waste Composting: Biological Processing*. Biomass & Bioenergy, v.3, n.3-4, p. 163-180.
- RICHARD, T.L. (1996a). *Estimating Carbon content*. <http://www.cfe.cornell.edu/compost/calc/carbon.html> (01 abr.)

- RICHARD, T.L. (1996b). Cornell Composting - Operator's Fact Sheets ; *Troubleshooting*. <http://www.cfe.cornell.edu/dept/compost/Fact.sheets/FS10.html>.
- SCHALCH, V. (1992). *Análise Comparativa do Comportamento de Dois Aterros Sanitários Semelhantes e correlação dos Parâmetros do Processo de Digestão Anaeróbia*. São Carlos, 219pp. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SCHALCH, V; LEITE,W.C.A. (1995). *Curso sobre gerenciamento de Resíduos Sólidos*. Fortaleza, ABES.
- SCHALCH, V. (1996). *SHS-715 Gerenciamento de Resíduos Sólidos - notas de aula*.
- SENESI, N.; BRUNETTI, G. (1996). *Chemical and Physico-Chemical Parameters for Quality Evaluation of Humic Substances Produced During Composting*. In: *The Science of Composting - European Commision International Symposium*, Blackie Academic & Professional. Anais. England, v.1 , pp 195-212.
- TCHOBANOGLIOUS, G. et al. (1993). *Integrated Solid Waste Management*, McGraw-Hill, Singapore.
- UNIVERSIDADE DE TORINO (s.d.). *Metodi di Analisi dei Composti - Determinazioni chimiche, fisiche, biologiche e microbiologiche. Analisi metocologice dei rifiuti*. Torino. Itália.
- VASCONCELOS, Y.(1998). *Paisagem Turva*. Revista Época, Ano I, nº 10, pp. 76-77, 27 jul.



VILLANI, F.T; PEREIRA NETO, J. T. (1993). *Estudo e avaliação de métodos químicos para determinar o grau de maturação na compostagem do lixo urbano domiciliar*. In: 17º Congresso brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES. Natal.