

**CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO E AVALIAÇÃO DA
RELAÇÃO CARBONO/NITROGÊNIO NA COMPOSTAGEM**

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA – CAMPUS II
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO E AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO
CARBONO/NITROGÊNIO NA COMPOSTAGEM

JULIANA PINTO MOTA

CAMPINA GRANDE – PB

2002

JULIANA PINTO MOTA

**CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO E AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO
CARBONO/NITROGÊNIO NA COMPOSTAGEM**

**Dissertação apresentada ao curso de Mestrado
em Engenharia Civil da Universidade Federal da
Paraíba – UFPB, em cumprimento às exigências
para obtenção do grau de Mestre**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Sanitária e Ambiental

ORIENTADORES: Prof. Dr. JOÃO TINÔCO PEREIRA NETO

Prof. Dr. BEATRIZ S. O. CEBALLOS

Campina Grande - PB

Fevereiro/2002



M917c Mota, Juliana Pinto.
Contribuição para o estudo e avaliação da relação carbono/nitrogênio na compostagem / Juliana Pinto Mota. -
Campina Grande, 2002.
68 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 2002.
"Orientação: Prof. Dr. João Tinôco Pereira Neto, Prof^ª.
Dr^ª. Beatriz S. O. Ceballos".
Referências.

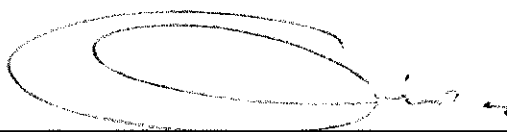
1. Resíduos Sólidos - Compostagem. 2. Carbono. 3.
Hidrogênio. 4. Elementos Físico-químicos. 5. Engenharia
Civil - Dissertação. I. Pereira Neto, João Tinôco. II.
Ceballos, Beatriz S. O. de. III. Universidade Federal da
Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 628.312.1(043)

**“CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO E AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO
CARBONO/NITROGÊNIO NA COMPOSTAGEM”**

JULIANA PINTO MOTA

COMISSÃO EXAMINADORA



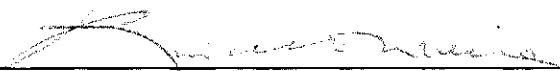
Prof. Dr. João Tinôco Pereira Neto

Orientador – LESA/DEC/UFV



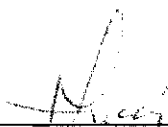
Prof. Dr. Beatriz Susana Ovruski de Ceballos

Orientadora – DEC/UFPB



Prof. Dr. Rui de Oliveira

Examinador Interno – DEC/UFPB



Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

Examinador Externo – DEC/UFPE

Campina Grande – PB

Fevereiro/2002

Aos meus Pais, Wellington e Socorro.

“Aquele que dá ensinamentos a seu filho será louvado por causa dele,
e nele mesmo se gloriará entre seus amigos”.

Eclo 30,1

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida, pelos ensinamentos e pela presença constante.

Aos meus orientadores Prof. Tinôco e Prof^ª. Beatriz, pela oportunidade de realizar a pesquisa em Viçosa – MG, pela orientação, dedicação e carinho.

Ao Prof. Tinôco, pelos ensinamentos científicos e religiosos.

Aos funcionários e estagiários do LESA (Marcelo, Marcos, Luciene, Júlio, Augustinho, Capelão, Pierre, Patrícia, Eder e Adriano) e da TECSAN (Fabiana e Herbert) por toda a ajuda e principalmente pela amizade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Aos professores do curso de pós-graduação em Engenharia Sanitária da UFPB.

Ao professor Fernando Egreja Filho, pelas dúvidas esclarecidas.

Aos funcionários do AESA pela ajuda prestada durante a realização das disciplinas do curso.

Aos colegas do curso, pelo companheirismo e amizade em especial à Franci pela sua amizade e por tudo que vivemos em Viçosa.

Aos meus amigos, em especial a Heline e Léo, que tanto me ajudaram nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais Wellington e Socorro, pelo incentivo, dedicação e principalmente por todo amor que têm me dado.

Aos meus irmãos Renato, Tiago e Ricardo que eu tanto amo.

Às minhas sobrinhas Alice e Taís por trazerem tanta alegria e amor à minha vida.

A Deiler, pelo companheirismo, pelo amor e por toda a felicidade que trouxe à minha vida.

E a todos que contribuíram para a realização desta dissertação, a minha eterna gratidão.

SUMÁRIO

LISTAS DE TABELAS	I
LISTAS DE FIGURAS	II
RELAÇÃO DE SIGLAS E ABREVIATURAS	IV
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Introdução	4
3.2 Conceitos Sobre Compostagem	6
3.3 Classificação dos Processos de Compostagem	7
3.3.1 Quanto à Temperatura	7
3.3.2 Quanto a Tecnologia Empregada	8
3.4 Processos de Compostagem	8
3.5 Microbiologia do Processo	10
3.5.1 Bactérias	11
3.5.2 Fungos	11
3.5.3 Actinomicetos	12
3.6 Fatores que Afetam os Processos de Compostagem	12

3.6.1	Teor de Umidade	13
3.6.2	Temperatura	14
3.6.3	Aeração	17
3.6.4	Concentração de Nutrientes	18
3.6.4.1	A Relação C/N	19
3.6.5	Tamanho das Partículas	22
3.6.6	pH	23
3.7	Alterações Ocorridas Durante o Processo de Compostagem	23
3.8	Utilização do Composto Orgânico	26
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	Introdução	29
4.2	Matérias-primas	29
4.3	Montagem do Experimento	30
4.3.1	Mistura do Material	30
4.3.2	Construção das Pilhas	32
4.3.3	Sistema de Aeração	33
4.3.4	Ciclo de Reviramento	33
4.4	Técnicas de Coleta e Preparação de Amostras	33
4.4.1	Amostras para Análises Físicas, Químicas e Físico-Químicas	34
4.4.2	Amostras para Análise Bacteriológica	34
4.5	Monitoramento	35
4.5.1	Determinações Físicas	35
4.5.1.1	Temperatura	35
4.5.1.2	Densidade	35

4.5.2	Análises Físico-Químicas	36
4.5.2.1	Teor de Umidade	36
4.5.2.2	pH	37
4.5.2.3	Teor de Sólidos Fixos e Voláteis	37
4.5.3	Análises Químicas	38
4.5.4	Análise Bacteriológica	38
4.5.4.1	Determinação de Estreptococos fecais	38
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	Introdução	39
5.2	Monitoramento	40
5.2.1	Determinações Físicas	40
5.2.1.1	Temperatura	40
5.2.1.2	Densidade	43
5.2.2	Análises Físico-Químicas	45
5.2.2.1	Teor de Umidade	45
5.2.2.2	pH	46
5.2.2.3	Teor de Sólidos Voláteis	48
5.2.3	Análises Químicas	49
5.2.3.1	Concentração de Nitrogênio	49
5.2.3.2	Concentração de Carbono Orgânico Total	50
5.2.3.3	Concentração de Fósforo	51
5.2.3.4	Concentração de Potássio	52
5.2.3.5	Concentração de Ácido Húmico	53
5.2.3.6	Relação C/N	54

5.2.4	Análise Bacteriológica	55
5.2.4.1	Determinação de Estreptococos fecais	55
5.2.5	Observações Gerais	56
6.	CONCLUSÕES	61
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Geração per capita de resíduos sólidos urbanos em alguns países	4
Tabela 3.2 – Composição percentual média do lixo domiciliar em alguns países	5
Tabela 3.3 – Temperatura e tempo para destruição dos patógenos e parasitas mais comuns	16
Tabela 3.4 – Relação C/N para alguns tipos de resíduos orgânicos	20
Tabela 3.5 – Valores estabelecidos como parâmetros de controle para compostos orgânicos e tolerância, conforme Legislação do Brasil	26
Tabela 4.1 – Parâmetros determinados em pilhas submetidas ao processo LESA de compostagem, no dia da montagem e no dia 90	32
Tabela 5.1 – Características das matérias-primas utilizadas	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Rejeito de uma pilha de compostagem após o peneiramento	10
Figura 3.2 – Perfil típico de temperatura numa pilha de compostagem	15
Figura 4.1 – Chegada do resíduo orgânico no pátio de compostagem	30
Figura 4.2 – Mistura do material auxiliar (serragem) ao resíduo orgânico	31
Figura 5.1 – Variação da temperatura na pilha constituída por resíduo orgânico urbano – PLR	40
Figura 5.2 – Variação da temperatura na pilha composta por 30% em peso de serragem e 70% de resíduo orgânico urbano – PLSR (30%)	41
Figura 5.3 – Variação da temperatura na pilha composta por 15% em peso de serragem e 85% de resíduo orgânico urbano – PLSR (15%)	41
Figura 5.4 – Variação da temperatura na pilha composta por 30% em peso de grama e 70% de resíduo orgânico urbano – PLGR (30%)	42
Figura 5.5 – Variação da temperatura na pilha composta por 15% em peso de grama e 85% de resíduo orgânico urbano – PLGR (15%)	42
Figura 5.6 – Variação da densidade e sólidos voláteis nas pilhas de compostagem	44
Figura 5.7 – Variação do teor de umidade nas pilhas de compostagem	45
Figura 5.8 – Variação do pH nas pilhas de compostagem	47
Figura 5.9 – Variação do teor de sólidos voláteis nas pilhas de compostagem	48
Figura 5.10 – Variação da concentração de nitrogênio nas pilhas de compostagem	49

Figura 5.11 – Variação da concentração de carbono orgânico total nas pilhas de compostagem	50
Figura 5.12 – Variação da concentração de fósforo nas pilhas de compostagem	51
Figura 5.13 – Variação da concentração de potássio nas pilhas de compostagem	52
Figura 5.14 – Variação da concentração de ácido húmico nas pilhas de compostagem	53
Figura 5.15 – Variação da relação C/N nas pilhas de compostagem	54
Figura 5.16 – Concentração de <i>Streptococos</i> fecais nas pilhas de compostagem	55
Figura 5.17 – Comportamento dos parâmetros monitorados na pilha PLR ao longo do processo	56
Figura 5.18 – Comportamento dos parâmetros monitorados na pilha PLSR (30%) ao longo do processo	57
Figura 5.19 – Comportamento dos parâmetros monitorados na pilha PLSR (15%) ao longo do processo	57
Figura 5.20 – Comportamento dos parâmetros monitorados na pilha PLGR (30%) ao longo do processo	58
Figura 5.21 – Comportamento dos parâmetros monitorados na pilha PLGR (15%) ao longo do processo	58
Figura 5.22 – Mudança das características da PLSR (30%)	59
Figura 5.23 – Mudança das características da PLSR (15%)	59
Figura 5.24 – Mudança das características da PLGR (30%)	60
Figura 5.25 – Mudança das características da PLGR (15%)	60

RELAÇÃO DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

C – Carbono

g – Grama

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

K – Potássio

Kg – Quilo

LESA – Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental.

m – Metros

N – Nitrogênio

OMS – Organização Mundial de Saúde.

P – Fósforo

PLGR (15%) – Pilha de lixo e grama aerada por reviramento, constituída por 15% de grama e 85% de resíduo orgânico urbano.

PLGR (30%) – Pilha de lixo e grama aerada por reviramento, constituída por 30% de grama e 70% de resíduo orgânico urbano.

PLR – Pilha de lixo aerada por reviramento.

PLSR (15%) – Pilha de lixo e serragem aerada por reviramento, constituída por 15% de serragem e 85% de resíduo orgânico urbano.

PLSR (30%) – Pilha de lixo e serragem aerada por reviramento, constituída por 30% de serragem e 70% de resíduo orgânico urbano.

Relação C/N – Relação Carbono/Nitrogênio.

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SF – Sólidos Fixos

SV – Sólidos Voláteis

RESUMO

Esta pesquisa foi realizada no Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA) da Universidade Federal de Viçosa – MG através do convênio existente entre a UFV e a Universidade Federal da Paraíba – Campus II. O período experimental ocorreu durante os meses de março a junho de 2001 e fundamentou-se na avaliação e comparação do grau de estabilização da matéria orgânica proveniente de resíduos sólidos urbanos submetida a compostagem sob diferentes relações C/N.

Com o objetivo de variar a relação C/N foram montados dois experimentos adicionando serragem ao resíduo orgânico urbano nas seguintes proporções: 30 e 15% em peso de serragem. Também foram realizados dois experimentos com adição de grama ao resíduo orgânico, nas mesmas proporções da serragem, e um experimento testemunha, contendo apenas resíduo orgânico proveniente do resíduo sólido urbano da cidade de Coimbra – MG.

Os experimentos foram monitorados durante 90 dias através da determinação de parâmetros físicos (temperatura e densidade), químicos (concentração de nitrogênio, carbono orgânico total, fósforo, potássio e ácido húmico), físico-químicos (teor de umidade, pH e teor de sólidos fixos e voláteis) e bacteriológicos (*Streptococos* fecais). Através deste monitoramento foi possível avaliar o grau de estabilização dos materiais submetidos à compostagem.

Foi verificada a possibilidade de adição de serragem e de grama ao resíduo orgânico urbano sem causar prejuízos à compostagem, desde que em proporções não superiores a 30% em peso.

A adição destes materiais trouxe benefícios para o processo, como a redução do tempo de compostagem, no experimento com adição de grama e a obtenção de um composto bacteriologicamente seguro, no experimento com adição de serragem. Portanto a compostagem além de ser uma solução eficiente para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, apresenta-se também como uma solução para as regiões que produzem grandes quantidades de serragem, bem como aquelas que produzem muitas podas e aparas de grama.

ABSTRACT

This research was carried out at the Laboratory of Sanitary and Environmental Engineering (LESA) of the Universidade Federal de Viçosa – MG through the interchange between the UFV and the Universidade Federal da Paraíba – Campus II. The experimental period happened from March to June of 2001 and was based on the evaluation and comparison of the stabilization degree of solid waste organic fraction, submitted to the composting process under different C/N ratios.

With the purpose to vary the C/N ratio, two experiments were made adding sawdust to the solid waste organic fraction in the followings proportions: 30 and 15%, and two experiments adding grass to the solid waste organic fraction, in the same proportions. A fifth experiment was made only with the solid waste organic fraction from Coimbra – MG.

The experiments were monitored during 90 days through the determination of the physical (temperature and density), chemical (nitrogen, total organic carbon, phosphorus, potassium and humic acids concentrations), physicochemical (moisture content, pH and the volatile and fixed solids) and microbiological (Fecal streptococci) parameters. Through this monitoring process it was possible to evaluate the degree of stabilization for these materials that were submitted to the composting process.

It was verified the possibility to add until 30% of sawdust or of grass (in weight) to the solid waste organic fraction without damaging the composting process.

The addition of these materials gave same benefits to the process, as the reduction of the composting period, in the experiment with grass and the obtainment of compost without bacteria, in the experiment with sawdust. Besides an efficient process of treatment for solid waste organic fraction, this can also be one solution to regions that produce a lot of sawdust, as well as that one who produce a lot of prune and scrap of grass.

1. INTRODUÇÃO

A população urbana vem crescendo assustadoramente nos últimos anos, e trazendo com isso muitos problemas para si e para o meio ambiente. Destaca-se a falta de acompanhamento desse crescimento com a ampliação do saneamento. Dados da OMS (Organização Mundial de Saúde) registram que 95% dos leitos hospitalares são ocupados por pessoas portadoras de doenças provocadas por falta de saneamento ambiental. Dentre as carências do saneamento básico, pode-se destacar as relacionadas com os resíduos sólidos, que contribuem com a contaminação do solo, do ar e das águas, além de estimular a proliferação de vetores de doenças infecciosas, como ratos, baratas e moscas (RIBEIRO FILHO e DE LUCENA, 2000).

Para prevenir e controlar as doenças relacionadas aos resíduos sólidos, é necessário que estes sejam acondicionados, coletados, transportados, tratados e dispostos adequadamente. Porém, no Brasil, 79,9% dos resíduos sólidos são coletados (IBGE, 1999), dos quais apenas 10% são destinados à aterros e 2% são tratados em usina de reciclagem e compostagem (IBGE, 1996).

Como as áreas para aterros sanitários estão sendo cada vez mais raras nos grandes centros urbanos, verifica-se uma crescente preocupação em se reduzir o volume de resíduos destinados aos mesmos, através de tentativas para diminuir os desperdícios e incentivar a prática da reciclagem. Além da redução das áreas de aterro, a reciclagem tem como principal vantagem a economia dos recursos naturais e de energia.

Dentre os materiais passíveis de serem reciclados tem-se a matéria orgânica, a qual ao ser compostada, possibilita o retorno dos nutrientes para o solo, melhorando a textura e a qualidade do mesmo. Num país agrícola como o Brasil, isto é de fundamental importância.

O Brasil é um país pobre, onde grande parte da sua população vive em condições de miséria, enquanto as classes mais favorecidas jogam em seus lixões um produto que se tratado corretamente ajudaria a produzir alimento e diminuir um pouco a fome desta população.

A compostagem de resíduos orgânicos é um dos métodos mais antigos de reciclagem, durante o qual a matéria orgânica é transformada em fertilizante orgânico.

Este processo é resultado da decomposição biológica aeróbica do substrato orgânico, sob condições que permitem o desenvolvimento natural de altas temperaturas, com formação de um produto suficientemente estável para armazenamento e aplicação ao solo, sem efeitos ambientais indesejáveis, denominado composto (HAUG, 1980; MESQUITA & PEREIRA NETO, 1992, citado em JAHNEL *et al.*, 1999).

O resíduo orgânico urbano, por ser bem diversificado, apresenta em sua composição nutrientes em proporções favoráveis para a sua degradação, não sendo, portanto necessária a correção da relação C/N para a compostagem deste resíduo.

Como a composição do lixo varia significativamente em função do grau de desenvolvimento econômico e do tipo de atividade, é importante verificar a interferência desta relação no processo de compostagem (tempo de compostagem e qualidade do composto) em regiões onde a economia gira em torno das marcenarias, por exemplo, pois estas apresentam grande quantidade de serragem no seu lixo quando a coleta realizada não é seletiva. A serragem por apresentar uma relação carbono/nitrogênio muito alta (o que pode variar de 100 a 400:1) eleva esta relação da fração orgânica do lixo quando misturada a este. Ocorre também uma variação na relação C/N em regiões que produzem muitas podas e aparas de grama.

2. OBJETIVOS

- ❖ Verificar a possibilidade da utilização a compostagem como um tratamento eficiente para resíduos como serragem e grama, que se constituem em problemas dos resíduos de muitas cidades do país, considerando-se principalmente a relação C/N como parâmetro do processo.
- ❖ Estudar a eficiência da compostagem em pilhas constituídas por matéria orgânica proveniente do resíduo sólido urbano e duas porcentagens diferentes de serragem e grama (30 e 15%).
- ❖ Avaliar, comparativamente, a evolução de parâmetros como tempo, temperatura, sólidos voláteis, fósforo, relação C/N, etc. ao longo do processo de compostagem nas pilhas que apresentam serragem em sua composição, bem como nas que apresentam grama. Comparando também, estas com a pilha testemunha (pilha constituída apenas de resíduo orgânico urbano).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

Os resíduos sólidos urbanos vêm se tornando uma grande preocupação no mundo, devido ao aumento da sua produção, da mudança do seu perfil e principalmente dos prejuízos causados ao homem e ao ambiente.

O aumento de sua produção se dá principalmente pelo crescimento populacional e o desenvolvimento industrial. Estima-se que o Brasil esteja atualmente gerando 110.000 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia (PEREIRA NETO, 1999).

O resíduo sólido é um indicador de desenvolvimento de uma nação: quanto maior a economia do país, maior será a sua geração (TABELA 3.1).

TABELA 3.1: Geração per capita de resíduos sólidos urbanos em alguns países

País	Per capita (kg/hab/dia)
Estados Unidos	3,2
Itália	1,5
Holanda	1,3
Japão	1,1
Brasil	1,0
Grécia	0,8
Portugal	0,6

FONTE: QUID e LIMPURB/SP citado por LIMA em REVISTA VEJA (MAR/1999)

Denomina-se lixo aos restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis (ABNT, 1987). PEREIRA NETO (1996) define lixo urbano como uma massa heterogênea de resíduos sólidos, resultantes das atividades humanas, os quais podem ser reciclados e parcialmente utilizados, gerando, entre outros benefícios, proteção à saúde pública e economia de energia e recursos naturais.

Por ser resultante das atividades humanas, a composição física e físico-química do lixo é bastante diversificada, variando de acordo com as condições sociais e econômicas e hábitos da população, condições climáticas e densidade populacional. A composição física refere-se aos percentuais dos componentes que formam a massa total dos resíduos, como: matéria orgânica putrescível, papel e papelão, plástico, vidro, metais, trapos e outros (TABELA 3.2). Na composição físico-química são determinados os teores de sólidos voláteis, nitrogênio, carbono, fósforo, potássio, etc.

TABELA 3.2: Composição percentual média do lixo domiciliar em alguns países

País	Componentes					
	Vidro	Papel/ Papelão	Plástico	Metal	Matéria Orgânica Putrescível	Rejeito*
Estados Unidos	5,0	44,0	10,0	7,0	0,0	34,0
Japão	1,0	40,0	7,0	2,5	0,0	49,5
Suécia	7,0	30,0	6,0	5,0	33,0	19,0
Brasil	1,6	24,5	2,9	2,3	52,5	16,2
México	8,2	20,0	3,8	3,2	54,4	10,4
Índia	0,2	2,0	1,0	0,1	78,0	18,7

* Rejeito: borracha, couro, madeira, trapos, etc.

FONTE: PHILIPPI JÚNIOR (1999) citado em IPT (2000)

A matéria orgânica putrescível, encontrada na massa de resíduo sólido urbano é responsável pela produção de chorume e gases que poluem o meio ambiente quando o resíduo é disposto de maneira inadequada. Além de propiciar a proliferação e alimentação de alguns animais como moscas, ratos e baratas que são normalmente vetores de doenças humanas, como tifo, leptospirose, peste bubônica e outras igualmente perigosas.

Uma solução eficiente e de baixo custo para o tratamento da fração orgânica é a compostagem, através da qual se produz um composto orgânico passível de ser utilizado na agricultura como fertilizante e condicionador de solos, entre outras aplicações.

Com a compostagem, além do aproveitamento agrícola da matéria orgânica, se reciclam nutrientes para o solo, elimina-se os patógenos encontrados na massa de

resíduos e ainda se tem uma economia de aterro, reduzindo cerca de 50% do lixo destinado ao mesmo (IPT, 2000).

Porém, como parte do material recebido não é aproveitado para a transformação em composto, a compostagem não é uma solução única, necessita ser completada, seja por incineração ou aterro dos rejeitos. Estes rejeitos são decorrentes da triagem à qual os resíduos sólidos urbanos são submetidos quando não existe um programa de coleta seletiva.

3.2 Conceitos Básicos Sobre Compostagem

A compostagem, segundo KIEHL (1985), é um processo controlado de decomposição bioquímica de materiais orgânicos, transformados em um produto mais estável, o composto. Segundo o mesmo autor este processo é semelhante ao que acontece na natureza com a manta florestal, diferenciando-se apenas por se propiciar condições favoráveis ao meio para acelerar a decomposição.

Segundo PEREIRA NETO (1987), compostagem é um processo aeróbio controlado, desenvolvido por uma população diversificada de microrganismos, de tratamento e estabilização de resíduos orgânicos para a produção de húmus. O processo compreende duas fases distintas: fase de degradação ativa e fase de maturação.

Na fase de degradação ativa ocorrem as reações bioquímicas de oxidação mais intensas, e a temperatura deve ser mantida na faixa termofílica (45 a 65°C). Na segunda fase do processo ocorre a humificação da matéria orgânica previamente estabilizada, e a temperatura do processo deve ser mantida na faixa mesofílica (abaixo de 45°C).

Segundo BLEY Jr. (1998) a biodegradação induzida, controlada e completa como a que ocorre nos processos de compostagem, conduz a matéria orgânica à estabilização, ou seja, à redução da atividade biológica pela exaustão dos estoques de alimentos e competição entre espécies e à transformação dos componentes químicos com a redução da carga carbonácea e à oxi-redução dos elementos químicos para formas mineralizadas.

No final da compostagem tem-se nutrientes minerais e o húmus, componente este imprescindível para melhorar as propriedades físicas do solo e para servir de condicionador dos nutrientes presentes no composto e no solo (KIEHL, 1998).

3.3 Classificação dos Processos de Compostagem

Os processos de compostagem podem ser classificados em função da disponibilidade de oxigênio (aeróbio ou anaeróbio), da temperatura do processo (termófilo ou mesófilo) e tecnologia empregada (sistema aberto ou fechado).

Nos processos anaeróbios a energia produzida é bem menor do que nos processos aeróbios, exigindo, portanto um maior período de tempo para que ocorra a bioestabilização da matéria orgânica e para que haja a destruição dos microrganismos patogênicos (LEITE *et al.*, 2001).

Segundo PEREIRA NETO (1987) a compostagem moderna é um processo necessariamente aeróbio, por ser mais eficiente em termos de decomposição da matéria orgânica, não produzir odores e ser caracterizada por uma elevação da temperatura suficiente para a sanitização da massa de compostagem. Neste contexto a compostagem anaeróbia não será considerada na presente revisão.

3.3.1 Quanto à Temperatura

Os processos de compostagem são classificados de acordo com a temperatura desenvolvida na massa de compostagem, em mesófilos e termófilos. Estes termos são usados para especificar a faixa de temperatura ótima para a atividade dos microrganismos responsáveis pela decomposição e estabilização da matéria orgânica.

Para GOLUEKE (1977), a compostagem mesofílica é o processo no qual se mantém a temperatura na faixa de 15 a 25°C e a compostagem termofílica é um processo operado a temperaturas na faixa de 45 a 65°C. Enquanto que para KIEHL (1985), temperaturas na faixa de 45 a 55°C indicam que o processo é mesófilo e o processo é termófilo quando a temperatura se encontra acima de 55°.

Para o presente estudo será considerado como termófilo o processo que opera em uma faixa de temperatura de 45 a 65°C, e mesófilo o processo que opera a temperaturas abaixo de 45°C (PEREIRA NETO, 1996).

3.3.2 Quanto à Tecnologia Empregada

Quanto ao ambiente onde os sistemas são operados, os mesmos podem ser classificados em abertos e fechados.

Os processos de compostagem são ditos abertos quando realizados a céu aberto, em pátio de compostagem, nos quais a massa a ser compostada é disposta em montes (KIEHL, 1985) e geralmente são aerados naturalmente através de reviramentos ou mecanicamente através da injeção ou sucção de ar (PEREIRA NETO, 1987).

Os processos de compostagem fechados são realizados através de dispositivos especiais tais como digestores, bioestabilizadores, torres e células de fermentação (LIMA, 1991). Neste sistema os fatores como temperatura, aeração, teor de umidade e adição de nutrientes podem ser rigorosamente controlados, produzindo assim uma taxa de decomposição inicial muito rápida, aproximadamente cinco dias (PEREIRA NETO, 1987). Porém, muitos desses processos não produzem um composto com grau de estabilização e maturação satisfatórios, sendo, portanto necessária a continuação da compostagem em leiras (GOLUEKE, 1977).

3.4 Processos de Compostagem

O processo de compostagem vem sendo utilizado desde os tempos mais remotos, quando, sobretudo os orientais, empregavam técnicas artesanais fundamentadas na formação de leiras ou montes de resíduos que ocasionalmente eram revolvidos. Após cessar o processo de fermentação, o composto resultante era incorporado ao solo, o que favorecia o crescimento dos vegetais (LIMA, 1991).

Com o intuito de se obter a estabilização da matéria orgânica mais rapidamente e em melhores condições vários sistemas de compostagem foram desenvolvidos, como o sistema Chinês, Indore, Beccari, Dano, CETESB, Windrow, Kiehl, entre outros (LIMA, 1991).

O processo utilizado nesta pesquisa foi o processo LESA de compostagem, o qual foi desenvolvido no laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

O processo LESA é uma versão aperfeiçoada do processo Windrow, e apresenta como característica principal a reversão das camadas ao se executar o reviramento. Dessa maneira, a camada mais externa, submetida a baixas temperaturas, passa a constituir o centro da pilha, onde são desenvolvidas temperaturas termófilas, propiciando assim uma maior sanitização do material (LELIS, 1998).

Trata-se de um processo de baixo custo, alta simplicidade operacional e grande eficiência, e que, por não depender de energia, tem seu uso recomendado em qualquer comunidade, principalmente em áreas carentes e zonas rurais do país. As principais características do processo são:

- a) A matéria-prima, no caso resíduo sólido urbano, não necessita de correção da relação carbono/nitrogênio, porém aconselha-se que as partículas do material sejam menores que 150mm. No caso de resíduos agrícolas, basta misturar 20% de esterco (de um ou vários animais) com 80% de resíduos vegetais (palhas de milho, feijão, arroz, etc.) e montar as leiras de compostagem com umidade em torno de 55%.
- b) As pilhas de compostagem (forma cônica) devem ter de 1,00 a 1,60m de altura e raio da base variando de 0,6 a 1,2m.
- c) O ciclo de reviramento, manual, deve ser feito a cada 3 dias durante os primeiros 30 dias, seguindo-se um reviramento a cada 5 dias por mais 30 ou 60 dias. Durante a fase de reviramento, deve-se observar as pilhas de compostagem para que a temperatura não exceda o limite de 40 a 65°C e que a umidade permaneça em torno de 50% e nunca abaixo de 40%.
- d) A leira de compostagem pode ser coberta com uma camada (150-200mm) do composto maturado, durante os primeiros 10 dias do processo, para evitar emissão de odores e atração de vetores (moscas, mosquitos, etc.) e também permitir o desenvolvimento de temperaturas favoráveis ao processo em toda a massa de compostagem.
- e) Na fase de maturação, as leiras poderão permanecer empilhadas (forma cônica), não sendo mais necessário efetuar o seu reviramento. Dependendo das características da matéria-prima e das condições climáticas locais, esta fase poderá durar de 1 a 2 meses.
- f) Após a maturação, o material peneirado estará pronto para o uso.

- g) O rejeito obtido após o peneiramento deve ser destinado a um aterro, o qual não precisa ser sanitário, pois este rejeito é inerte e, portanto não é potencialmente poluente (FIGURA 3.1).



FIGURA 3.1 – Rejeito de uma pilha de compostagem após o peneiramento

3.5 Microbiologia do Processo

A decomposição da matéria orgânica no processo de compostagem é conduzida por uma população diversificada de microrganismos, como numerosas bactérias, entre elas actinomicetos e diversos fungos (PEREIRA NETO, 1987). Os resíduos orgânicos urbanos já são colonizados com grande número e diversidade destes microrganismos, os quais são ativos na decomposição de partículas ou de uma fração da matéria orgânica específica em diferentes etapas, e mostram grande variedade de características fisiológicas relativas à concentração de oxigênio e de temperatura (VILLANI, 1993).

Com respeito às necessidades de oxigênio livre, os microrganismos podem ser caracterizados como aqueles que requerem O_2 na concentração em que este se encontra na atmosfera (20%), denominados aeróbios; aqueles que não necessitam de oxigênio livre, os anaeróbios; e aqueles que podem crescer em ausência ou presença de oxigênio livre, que são os facultativos. Quanto à variação da temperatura que favorece sua atividade, os microrganismos podem ser classificados como psicrófilos: aqueles que são ativos a temperaturas de 10 a 20°C; mesófilos: ativos a temperaturas de 20 a 45°C e termófilos: aqueles que são ativos a temperaturas de 45 a 65°C (PEREIRA NETO, 1996).

3.5.1 Bactérias

As bactérias são organismos unicelulares procarióticos, que podem viver isolados ou formando associações de células similares denominadas colônias. Sua multiplicação é feita, geralmente, por divisão binária (PELCZAR *et al.*, 1980).

Muitas bactérias, denominadas autótrofas exigem apenas o dióxido de carbono como sua fonte de carbono, enquanto outras precisam de um ou vários compostos orgânicos, as heterótrofas, e diferem entre si quanto aos tipos desses compostos orgânicos que podem utilizar. Quanto ao nitrogênio, as bactérias são muito versáteis; alguns tipos usam o nitrogênio atmosférico, são as fixadoras de N₂, outras crescem na presença de compostos nitrogenados inorgânicos, como NO₃⁻ ou NO₂⁻ e outras retiram seu nitrogênio das proteínas ou de outros compostos orgânicos nitrogenados (PELCZAR *et al.*, 1980).

Na compostagem as bactérias são encontradas durante todos os estágios do processo, apresentando maior taxa de crescimento na faixa de pH entre 6 a 7,5 (GOLUEKE, 1977). Seu metabolismo contribui com as modificações deste parâmetro ao longo do processo.

As bactérias são responsáveis pela degradação inicial da matéria orgânica, assim como das fases posteriores de biodegradação, o que gera a liberação de calor na massa de compostagem (PEREIRA NETO, 1987). Na faixa mesófila, as bactérias metabolizam carboidratos e proteínas complexas, e na faixa termófila são decompostos também proteínas, lipídeos e frações de hemicelulose (WPCF, 1985).

3.5.2 Fungos

Os fungos são organismos heterotróficos, que obtêm seu alimento a partir da matéria orgânica em decomposição ou nutrindo-se como parasitas de hospedeiros vivos. Decompõem resíduos complexos de plantas e animais, transformando-os em formas químicas mais simples, que retornam ao solo (PELCZAR *et al.*, 1980).

O pH de atuação dos fungos está preferencialmente na faixa ácida. Durante o processo de compostagem os fungos degradam os compostos carbonados mais

complexos como celulose, lignina, queratina, atuando preferencialmente na fase termofílica e com altos teores de umidade (ALEXANDER, 1977).

3.5.3 Actinomicetos

Os actinomicetos são bactérias filamentosas, apresentam preferências nutricionais e crescimento lento, o que faz com que sejam ecologicamente intermediários entre bactérias e fungos. Estes microrganismos preferem condições úmidas, altamente aeróbias e pH neutro ou levemente alcalino (MILLER, 1996).

Os actinomicetos termofílicos são comumente encontrados a temperaturas em torno de 50°C e poucas espécies são encontradas na massa de compostagem com temperaturas em torno de 65°C (LACEY, 1973 citado em MILLER, 1996).

Podem metabolizar uma variedade de nutrientes orgânicos como celulose, lignina, proteína e hemicelulose que os transformam em húmus (PEREIRA NETO, 1987).

As colônias de actinomicetos se manifestam através da cor esbranquiçada que conferem as leiras, em particular às partículas situadas a aproximadamente 15 cm de profundidade da superfície da leira (PEREIRA NETO, 1996).

Os actinomicetos são encontrados em maior quantidade na fase de maturação, pois são competidores ineficientes no estágio inicial da compostagem, quando o nível de nutrientes é elevado e as bactérias metabolizam rápida e ativamente os materiais mais facilmente biodegradáveis (BIDDLESTONE e GRAY, 1991 e BEFFA *et al*, 1996; citados em LELIS, 1998).

3.6 Fatores que Afetam os Processos de Compostagem

Por ser um processo biológico, a compostagem é afetada por todos os fatores que possam influenciar na atividade dos microrganismos. Dentre estes fatores os mais importantes são:

- Teor de umidade;
- Temperatura;

- Aeração;
- Concentração de nutrientes;
- Tamanho das partículas, e;
- pH

O controle desses parâmetros está diretamente relacionado com a eficiência do processo, ou seja, no tempo de compostagem e com a qualidade do composto (PEREIRA NETO, 1987).

3.6.1 Teor de Umidade

A presença de água é imprescindível na compostagem para atender as necessidades fisiológicas dos microrganismos, os quais não vivem na sua ausência ou com sua escassez (KIEHL, 1998). Isso porque, dentre outros fatores, a estrutura dos microrganismos consiste de 90% de água e todo o nutriente necessário para o metabolismo celular precisa ser dissolvido em água para ser assimilado (BRADY, 1989; GOLUEKE, 1991; PEREIRA NETO, 1989).

Teoricamente, o teor de umidade ideal para o processo de compostagem é de 100%, porém, alguns fatores de ordem operacional alteram esse valor para limites mínimos e máximos (GOLUEKE, 1991). Na prática a umidade ótima é função da capacidade de aeração do processo, da estrutura do material a ser compostado e da necessidade de suprir o metabolismo microbiano (CARDENAS e WANG, 1980).

Segundo PEREIRA NETO (1996) teores de umidade maiores que 60%, podem causar anaerobiose do meio, pois a água ocupará os espaços vazios da massa, impedindo a oxigenação da mesma. Por outro lado, baixos teores de umidade, menores que 40%, inibem a atividade microbiana de degradação dos resíduos orgânicos. Portanto, o teor de umidade deve se situar em torno de 55% nos processo de compostagem. Segundo o mesmo autor materiais vegetais secos requerem índices de 5 a 10 pontos percentuais maiores.

A correção da umidade nas pilhas ou leiras de compostagem é feita através de revolvimentos, e no caso de umidade abaixo do limite, aplica-se água à toda a massa uniformemente durante o revolvimento (PEREIRA NETO, 1987). A irrigação sem o revolvimento não distribui a água de forma homogênea o que promove a criação de

caminhos preferenciais, podendo assim provocar a produção de chorume (KIEHL, 1985).

3.6.2 Temperatura

A temperatura tem uma grande importância na compostagem, não só como fator para eliminação de microrganismos, mas também como fator que influencia a conservação ou perda dos nutrientes (ARAGÃO e STENTIFORD, 1999).

Segundo MILLER (1996) a pobre condução de calor da matéria orgânica combinada com a elevada quantidade de substratos disponíveis faz com que o sistema acumule o calor liberado no metabolismo microbiano. Este acúmulo de calor eleva a temperatura da leira (MILLER, 1996), fazendo com que a mesma, que logo após sua montagem, apresentava uma temperatura próxima da ambiente, atinja em dois a cinco dias temperaturas na faixa termofílica (50 a 60°), o que indica condições de equilíbrio no sistema (PEREIRA NETO, 1987).

Todos os microrganismos têm uma temperatura ótima de desenvolvimento, e uma variação extrema dessa temperatura provoca redução de sua população e da atividade metabólica com conseqüente aumento do tempo de decomposição da matéria orgânica (BRADY, 1989).

A compostagem moderna está associada ao desenvolvimento de temperaturas termofílicas, controladas em torno de 55°C (PEREIRA NETO, 1996). Temperaturas acima de 60°C reduzem a biodiversidade, diminuindo a atividade dos fungos termófilos, e a reação de decomposição continua principalmente pela ação dos actinomicetos e das bactérias com capacidade de esporular (BEFFA et al., 1996). Em temperaturas na faixa de 80 a 85°C cessa a atividade microbiana, passando a predominar reações químicas (WAKSMAN, 1983). PEREIRA NETO (1989) relata que temperaturas elevadas (acima de 65°) associadas a meios alcalinos (pH acima de 7,5), proporcionam a perda de nitrogênio do sistema pela volatilização da amônia.

Segundo KIEHL (1985) temperaturas acima de 70°C são consideradas desnecessárias ou mesmo desaconselháveis por longos períodos, pois restringem o número dos microrganismos que conseguem viver. Essa situação pode provocar alterações químicas indesejáveis e desprendimento de amônia, principalmente quando o

material possui baixa relação C/N. Segundo o mesmo autor materiais ricos em proteínas, com relação C/N baixa ($< 26/1$), aquecem-se mais rapidamente e alcançam maior temperatura que os celulósicos, com elevada relação C/N.

As pilhas de compostagem apresentam diferentes temperaturas entre as regiões situadas no interior da massa de compostagem e as camadas mais externas e entre a parte superior e aquela junto à base (FIGURA 3.2). A temperatura ambiente não tem grande influência sobre a temperatura das pilhas; assim, mesmo nos dias mais frios a massa permanece aquecida, desprendendo calor e vapor d'água. A perda de calor é proporcional às dimensões da pilha: as mais largas e altas, por terem superfície de exposição proporcionalmente menor que os pequenos montes e um volume gerador de calor proporcionalmente maior, perdem menos calor, aquecendo-se mais rapidamente e mais intensamente (KIEHL, 1985).

A FIGURA 3.2 apresenta um esquema da distribuição da temperatura em uma leira de compostagem.



FIGURA 3.2: Perfil típico de temperatura numa pilha de compostagem.

FONTE: RUSSO (1998)

Segundo PEREIRA NETO (1987), para que se obtenha uma maior eficiência do processo, se faz necessária a manutenção de temperaturas termofílicas controladas pelo período mais longo possível durante o processo. Tal procedimento garante uma série de vantagens como:

- desenvolvimento de uma população microbiana diversificada;
- aumento da taxa de degradação da matéria orgânica;
- importante mecanismo na eliminação de microrganismos patogênicos;

- eliminação de sementes de ervas daninhas, ovos de parasitas, larvas de insetos.

A TABELA 3.3 mostra alguns microrganismos patogênicos e o tempo necessário para a sua eliminação.

TABELA 3.3: Temperatura e tempo para destruição dos patógenos e parasitas mais comuns.

Organismos	Temperatura e Tempo para Destruição
<i>Salmonella typhi</i>	Não se desenvolve acima de 46°C; morre dentro de 30 minutos entre 55 e 60°C
<i>Salmonella spp</i>	Morre dentro de uma hora a 55°C ou morre dentro de 15 a 20 minutos a 60°C.
<i>Shigella spp</i>	Morre dentro de uma hora a 55°C.
<i>Escherichia coli</i>	A maior parte morre em uma hora a 55°C ou dentro de 15 a 20 minutos a 60°C.
<i>Entamoeba histolytica</i> (cistos)	São destruídos a 68°C.
<i>Taenia saginata</i>	Morre dentro de 5 minutos a 71°C.
<i>Trichinella spiralis</i> (larvas)	A infestação é reduzida em uma hora de exposição a 50°C, morrendo a 62-72°C.
<i>Necator americanus</i>	Morre dentro de 50 minutos a 45°C.
<i>Brucella abortus</i> ou <i>B. suis</i>	Morrem dentro de 50 minutos a 45°C.
<i>Micrococcus pyogenes var. aureus</i>	Morre dentro de 10 minutos a 50°C.
<i>Streptococcus pyogenes</i>	Morre dentro de 10 minutos a 54°C.
<i>Mycobacterium tuberculosis var. hominis</i>	Morre dentro de 15 a 20 minutos a 66°C ou momentaneamente a 67°C.
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	Morre dentro de 45 minutos a 55°C.

FONTE: KIEHL, 1985.

A sanidade do composto é uma das preocupações centrais na compostagem, sendo as temperaturas da massa compostada o fator essencial para o seu controle. Entre outros podem ser citados: a competição entre espécies, fim de substratos, fatores antibióticos e tempo de exposição à alta temperatura (BLEY Jr., 1998).

Temperaturas elevadas podem ser reduzidas fazendo-se revolvimentos mais frequentes, diminuindo o tamanho da leira ou irrigando-a durante a operação de revolvimento (KIEHL, 1998).

Segundo PEREIRA NETO (1987) a compostagem moderna utiliza apenas artifícios da engenharia, como por exemplo a aeração e redução ou aumento da área de superfície do material, para manter a temperatura controlada (entre 40 a 65°C) em toda a massa de compostagem durante um período mais longo possível. Tão logo a fonte de carbono mais imediata tenha sido completamente esgotada, a temperatura da leira ou pilha cai para valores mais baixos (35 a 38°C), indicando o fim da primeira fase do processo. Em seguida, o material deve ser posto para maturação, para que continue o seu processo de estabilização, permitindo que o carbono remanescente (ligado às moléculas mais resistentes à biodegradação como as celuloses e ligninas) seja mineralizado.

3.6.3 Aeração

A aeração é o principal mecanismo para aumentar a velocidade de decomposição do material orgânico, além de evitar altos valores de temperatura no decorrer do processo, diminuir a emissão de maus odores e a proliferação de vetores, o que constitui um fator estético para o local e recomendável para a saúde pública (PEREIRA NETO, 1989 e KIEHL, 1985).

A decomposição da matéria orgânica pode ser realizada em ambiente aeróbio ou anaeróbio, porém quando a temperatura está em torno de 55°C ocorre um consumo elevado de oxigênio, tornando-se necessário encontrar um mecanismo de aeração capaz de satisfazer esta demanda, seja por reviramento ou uma aeração forçada (PEREIRA NETO *et al.*, 1985).

Segundo PEREIRA NETO (1988), a taxa ótima de aeração seria a que satisfizesse a demanda bioquímica de oxigênio, durante as diversas fases do processo. Entretanto, o mesmo autor menciona que alguns fatores de ordem prático-operacional e as influências exercidas pela temperatura, teor de umidade, natureza do material a ser compostado, tamanho das partículas, modo de aeração e outros, inviabilizam este objetivo.

O teor de oxigênio não pode baixar demasiadamente durante o processo. Se isto ocorrer, acarretará a morte dos microrganismos aeróbios, os quais serão substituídos pelos anaeróbios, resultando numa decomposição lenta da matéria orgânica, produzindo odores desagradáveis e atração de vetores biológicos, como moscas, ratos entre outros (BRADY, 1989).

De acordo com BERTOLDI *et al.* (1984) citado em PEREIRA NETO (1987), o ar contido na interface da massa em compostagem varia sua composição com o início da atividade oxidativa microbiana. A concentração de dióxido de carbono aumenta gradualmente e o nível de oxigênio tende a diminuir.

Segundo FINSTEIN e MILLER (1984), dois métodos básicos podem ser utilizados para aerar a massa de compostagem: o material pode passar por um meio saturado de oxigênio, através do reviramento do material ou o oxigênio pode ser forçado a passar através da leira, por meio de uma bomba de aeração.

3.6.4 Concentração de Nutrientes

A fração orgânica dos resíduos, produzidos pelo homem, é sem dúvida uma ótima fonte de aminoácido e proteínas, sais minerais e vitaminas, assim como de micro e macronutrientes essenciais à boa atividade microbiana no processo de oxidação durante a compostagem. O crescimento e a diversificação dos microrganismos na massa de compostagem estão relacionados, diretamente, com a concentração de nutrientes, os quais fornecem material para a síntese celular e suprem a energia necessária para o crescimento microbiano, além de outras funções (PEREIRA NETO, 1989).

Quanto mais diversificado for o material a ser compostado, mais variados serão os nutrientes disponíveis para a população microbiana e, em consequência, mais eficiente será o processo de oxidação (PEREIRA NETO, 1987).

SIQUEIRA (1988), afirma que são dezessete os elementos conhecidos como essenciais ao crescimento de plantas e microrganismos, sendo que oito destes são necessários em quantidades mínimas, que são os denominados micronutrientes: ferro, manganês, zinco, cobre, boro, molibdênio, cobalto e cloro. Seis são denominados macronutrientes, pois tanto as plantas quanto os microrganismos necessitam em maiores

quantidades: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Os outros três elementos essenciais são o carbono, o hidrogênio e o oxigênio.

Em termos práticos, quanto à concentração de nutrientes, os principais são o carbono e o nitrogênio (relação C/N), cuja concentração torna-se fator de grande importância na compostagem, pois são básicos para o crescimento dos microrganismos (PEREIRA NETO, 1987).

3.6.4.1 A Relação C/N

Todos os compostos orgânicos contêm carbono combinado com um ou mais elementos (SAWYER *et al.*, 1994). Os teores de carbono da biomassa microbiana variam de 40 a 55% da sua matéria seca (VILLELA, 1972).

A demanda biológica de carbono é maior que a de nitrogênio, onde 2/3 do carbono é utilizado para a produção de energia, liberando CO₂ e 1/3 se combina com o nitrogênio para a produção de novas células (DA SILVEIRA, 1987). Contudo, há um limite para o excesso de carbono sobre o nitrogênio (GOUVÊA, 1995). De acordo com PEREIRA NETO (1987), no decorrer da decomposição da matéria orgânica alguns componentes são mais rapidamente utilizados que outros, pela ação de enzimas e microrganismos. O mesmo autor afirma que os aminoácidos, os açúcares e as proteínas que constituem a fração solúvel em água são os primeiros compostos a serem metabolizados. A celulose e a hemicelulose são mais resistentes e, portanto, permanecem um período de tempo maior na massa de compostagem, o qual é relativamente curto, quando comparado com a permanência das ligninas, que são moléculas altamente resistentes, tornado-se às vezes, relativamente mais abundantes na matéria orgânica em decomposição (BRADY, 1989).

Segundo BRADY (1989) a natureza dos compostos, a serem metabolizados, faz com que ocorra uma variação da relação C/N da matéria orgânica (TABELA 3.4). O mesmo autor salienta que a atividade biológica diminui sensivelmente quando os materiais celulolíticos, ricos em carbono (resíduos vegetais) são compostados, em virtude da deficiência de nitrogênio. O excesso de carbono, neste caso, irá propiciar condições ácidas à massa de compostagem, visto que o CO₂ liberado é altamente solúvel.

TABELA 3.4: Relação C/N para alguns tipos de resíduos orgânicos.

MATERIAL	RELAÇÃO C/N
Resíduos de processamento de alimentos	
Resíduos de frutas	34,8
Mistura de vegetais	2,0
Resíduos de batata	25,0
Estercos	
De vaca	18,0
De cavalos	25,0
De suínos	20,0
De aves	15,0
De ovelhas	22,0
Esgotos	6,3 – 15,7
Materiais lenhosos	
Resíduos de processamento de madeira	170,0
Madeira de pinus	723,0
Maravalha	200,0 – 500,0
Papéis	
Mistura	173
Jornal	983
Revistas	470
Envelopes	223
Podas e aparas	
Gramas	20,1
Folhas mortas (recentes)	40,0 – 60,0
Aguapé	21
Gramma bermuda	24

FONTE: Baseado em TCHOUBANOLOUS *et al.* (1979) citado por BLEY Jr. (1998).

GOLUEKE (1977) destaca que na compostagem de resíduos com baixo teor de carbono, ou seja, resíduos ricos em nitrogênio (lodo de esgoto e outros), ocorre eliminação de excesso de nitrogênio pela volatilização da amônia, como uma tendência natural de restabelecer o balanço entre os dois elementos. Segundo o mesmo autor, este

equilíbrio é um fator de fundamental importância no processo de compostagem, cujo principal objetivo é criar condições favoráveis para que haja fixação de nutrientes, de modo que estes possam ser posteriormente liberados, por meio do composto produzido.

Os microrganismos absorvem os elementos C e N em uma proporção de trinta partes de carbono para cada parte de nitrogênio (KIEHL, 1985). Segundo o mesmo autor consideram-se os limites 26 e 35 como sendo as relações C/N mais recomendadas para uma rápida e eficiente compostagem.

Segundo DE BERTOLDI *et al.* (1983) a relação C/N ótima no início do processo de compostagem é de 25/1. PEREIRA NETO (1989), cita que a relação C/N inicial mais favorável ao processo está entre 30 a 40/1.

DA SILVEIRA (1987), constatou que relações entre 20/1 e 27/1 não proporcionaram qualquer alteração no processo, no tempo e na qualidade do composto enquanto que relações abaixo de 20/1 afetaram negativamente o tempo de compostagem, aumentando-o. Segundo o mesmo autor, relações abaixo de 20/1 contribuem para uma menor estabilidade do produto compostado, quando comparado com outras situações estudadas.

Em certas circunstâncias, a relação C/N pode ser elevada especialmente se o material a ser compostado for muito rico em carbono, como é o caso de resíduos de madeiras, em que o carbono não está facilmente disponível para os microrganismos. Nestes casos, o valor de C/N elevado não corresponde ao C/N biodisponível; este na realidade é mais baixo. Pode elevar-se o ataque dos microrganismos às celulosas e ligninas triturando o material e misturando-o com material proveniente de instalações pecuárias, ricas em nitrogênio (RUSSO, 1988).

Segundo PEREIRA NETO (1987) a relação C/N pode ser sugerida como um parâmetro para indicar quando o composto está estabilizado, devendo esta ser menor que 15/1 ao final do processo.

Quando se aplicam ao solo materiais orgânicos que apresentem uma relação C/N elevada, os microrganismos, além de reciclarem o nitrogênio dos que morrem, retiram também nitrogênio do solo na forma nítrica ou amoniacal, procurando, com isso, restabelecer o equilíbrio. Essa prática produz deficiência de nitrogênio nas plantas, com sintomas de clorose, podendo chegar em casos mais extremos até à necrose das folhas e morte do vegetal. Entretanto, quando o excesso de carbono for eliminado, a matéria

húmica estará sendo mineralizada, ou seja, o nitrogênio orgânico estará se transformando em nitrogênio mineral solúvel, voltando a ser disponível a raízes das plantas (KIEHL, 1985).

3.6.5 Tamanho das Partículas

O tamanho da partícula é uma característica importante a ser considerada, pois exerce grande influência no processo de compostagem, visto que, quanto mais fragmentado for o material a ser compostado, maior será a área superficial sujeita ao ataque microbiano, diminuindo o período de compostagem (PEREIRA NETO, 1989).

Segundo o mesmo autor, em termos práticos, o tamanho da partícula é limitado por fatores de ordem técnico-operacional, como a necessidade de aumentar a porosidade do material para facilitar sua aeração, mantendo, porém, as características estruturais para a formação da pilha de compostagem, cuja altura é definida com base neste parâmetro, tentando evitar a compactação excessiva no decorrer da compostagem.

A redução do tamanho das partículas poderá ser obtida através do uso de trituradores, os quais geralmente possuem dispositivos que regulam a abertura da câmara de trituração, promovendo assim uma melhor homogeneização do material. Entretanto, fatores como o custo de aquisição, a disponibilidade de energia elétrica no local e a necessidade de manutenção preventiva, evitando-se o desgaste prematuro de seu mecanismo interno limitam sua utilização (LELIS, 1998).

Há ainda uma consideração de ordem técnica a fazer quando do uso de resíduo urbano para a compostagem. O uso de triturador visando a redução/homogeneização das partículas, proporciona um problema mais grave do que os problemas que a operação visaria resolver, qual seja, a trituração de pilhas/baterias, lâmpadas, tubos de chumbo, etc., que liberariam com a fragmentação, os metais pesados que contém, acabando por contaminar quimicamente o composto (BLEY Jr, 1998).

O tamanho ideal das partículas deve situar-se na faixa de 20 a 50 mm para um bom andamento da compostagem (GOLUEKE, 1991).

3.6.6 pH

Segundo DE BERTOLDI *et al.* (1983) o pH ótimo para o crescimento dos microrganismos, durante o processo de compostagem, situa-se entre 5,5 e 8,0. As bactérias preferem um meio próximo ao neutro (6,5 a 7,5) e os fungos desenvolvem-se melhor entre 5,5 e 8,0 (PELCZAR *et al.*, 1980; ALEXANDER, 1977 e GOLUEKE, 1991). De modo geral, durante a compostagem, o pH tende a ficar na faixa neutra para alcalina, variando de 7,5 a 9,0 (GOUVÊA, 1995).

No início do processo a amonificação microbiana eleva o pH a taxas entre 8 e 8,5. Assim que o nitrogênio disponível é utilizado, a amonificação decai e o pH baixa para 7,5 a 8,0 (MILLER, 1996).

Segundo PEREIRA NETO (1987) existe um fenômeno de “auto-regulação” do pH, efetuado pelos microrganismos no decorrer do processo, não sendo, portanto o pH um fator crítico no processo.

3.7 Alterações Ocorridas Durante o Processo de Compostagem

Na leira de compostagem, se as condições de umidade e aeração forem favoráveis, haverá inicialmente uma rápida decomposição, que decrescerá de ritmo com o tempo (DE BERTOLDI *et al.*, 1983). Participam deste ataque numerosos microrganismos como bactérias, actinomicetos e fungos. O ataque dos microrganismos à matéria orgânica resulta na liberação de elementos químicos importantes, como o nitrogênio, o fósforo, o cálcio e o magnésio, os quais deixam a forma dita imobilizada para passarem à forma de nutrientes minerais (mineralizada), disponíveis às plantas e aos demais microrganismos (ALEXANDER, 1977).

Os resíduos animais e vegetais não são igualmente atacados nem se decompõem inteiramente de uma só vez. Seus vários constituintes são decompostos em vários estágios, com diferentes intensidades, por populações distintas de microrganismos que experimentam uma colonização sucessiva das leiras (SIQUEIRA, 1988).

Primeiramente, são atacados os compostos de mais fácil degradação, como os açúcares, os amidos, os aminoácidos, etc. Este ataque é realizado pelos microrganismos mesofílicos e a energia liberada durante a decomposição é retida na leira devido à

natureza isolante-térmica da matéria orgânica, havendo conseqüentemente um aumento de sua temperatura (GOLUEKE, 1977).

Assim que a temperatura começa a aumentar, as bactérias mesofílicas são sucedidas por bactérias termofílicas que passam gradativamente a ser predominantes ao lado de populações de fungos termofílicos. Nesta fase o pH que é inicialmente ácido na compostagem (4,5 a 6,0), passa para a faixa neutra-alcálica (7,0 a 8,0) (PEREIRA NETO, 1996).

Bactérias termofílicas, fungos e actinomicetos multiplicam-se tão logo a temperatura atinja a faixa de 55-60°C e iniciam o ataque aos polissacarídeos, como amido, celulose e proteínas, transformando-os em subprodutos (açúcares simples e aminoácidos), que são utilizados por várias outras espécies de microrganismos. Essa faixa de temperatura caracteriza a fase de degradação ativa (PEREIRA NETO, 1996). Segundo MILLER (1996), o calor desenvolvido durante a fase termofílica da compostagem é muito importante para a redução de patógenos. Os organismos patogênicos são facilmente destruídos, desde que durante a compostagem se atinja temperaturas de 60 a 70°C por no mínimo três dias consecutivos (MILLER, 1996).

Após esta fase mais ativa de oxidação, o calor produzido é insuficiente para manter a temperatura na faixa termofílica devido a exaustão das fontes mais imediatas de carbono, tem-se, portanto, uma fase de resfriamento e a temperatura no interior da massa de compostagem começa a declinar para valores inferiores a 60°C. Nessa fase, os microrganismos, mesofílicos, principalmente os fungos e os actinomicetos, situados nas zonas periféricas da leira, reinvaem a massa de compostagem, recomeçando um ataque aos compostos mais resistentes. Os microrganismos mesofílicos tornam-se predominantes, embora a temperatura continue decrescendo até igualar-se à ambiente (PEREIRA NETO, 1987). Toda a atividade microbiana cai progressivamente para taxas muito baixas, devido a resistência à decomposição do substrato remanescente (MILLER, 1996).

Esta fase, dependendo da matéria-prima utilizada e do processo de compostagem empregado, demanda cerca de 30 dias para os processos acelerados, podendo chegar até a 90 dias nos processos mais artesanais (PEREIRA NETO, 1996).

Quando a temperatura atingir a faixa de 40°C, o material deve ser posto para maturar. A maturação é a segunda fase do processo de compostagem, onde ocorre a humificação da matéria orgânica previamente estabilizada na primeira fase e também

promove a redução de patógenos remanescentes da primeira fase, melhorando assim, a sanitização do produto final (PEREIRA NETO, 1987).

Durante a maturação, os fungos e, principalmente, os actinomicetos tornam-se o grupo dominante, dando continuidade à degradação de substâncias mais resistentes, como a celulose e a lignina. Nessa fase, ocorrerão complexas reações enzimáticas, levando à produção de húmus por meio, principalmente, da condensação entre ligninas e proteínas, provenientes da morte de microrganismos. O material se torna progressivamente mais humificado, apresentando aspecto de terra vegetal, podendo ser aplicado ao solo sem causar danos agrícolas nem impactos ambientais adversos (BIDDLESTONE e GRAY, 1991 citado em LELIS, 1998).

A fase de maturação demanda cerca de dois a quatro meses, dependendo da matéria-prima, das características do processo e das condições climáticas locais (PEREIRA NETO, 1988).

Segundo GOUVEIA e PEREIRA NETO (2000) caso o composto seja utilizado sem sofrer o processo de maturação, as reações bioquímicas que levam à produção de fitotóxicos (resultantes da contínua degradação de resíduos complexos como celulose e lignina), ocorrerão no solo. A amônia poderá ser liberada no solo e danificar as raízes das culturas e a alta relação C/N (característica dos produtos não maturados) ocasionará redução bioquímica do nitrogênio do solo, em consequência do uso do carbono residual, isto produzirá deficiência de nitrogênio nas plantas. Na fase de maturação estas reações deverão ocorrer e eliminar os fitotóxicos na pilha de compostagem durante o processo de humificação.

Porém, uma decomposição levada além do necessário produz um composto demasiadamente mineralizado, com menor qualidade como condicionador orgânico (KELLER, 1960; HORSTMANN, 1961; citados em DA SILVEIRA, 1987).

Torna-se assim, indispensável, a existência de um método que permita definir o grau de estabilidade do composto. Cita-se, entre esses métodos, a determinação do pH, o declínio da temperatura, a determinação da matéria orgânica degradável, a dosagem dos sólidos voláteis, da relação C/N e dos compostos húmicos (DA SILVEIRA, 1987).

A utilização da relação C/N traz problemas, pois, por um lado, a determinação do carbono não está normalizada, existindo tantos tipos de relação C/N quantos os métodos de determinação do carbono; por outro lado, o valor limite da relação C/N, a partir do qual o composto é considerado maduro, varia de acordo com o tipo de

materiais. A verdade é que a relação C/N, determinada na amostra seca dos compostos, não pode ser utilizada como indicador absoluto da respectiva estabilidade (DA SILVEIRA, 1987).

TABELA 3.5: Valores estabelecidos como parâmetros de controle para compostos orgânicos e tolerância, conforme Legislação do Brasil.

Parâmetro	Valor	Tolerância
pH	Mínimo de 6,0	Até 5,4
Umidade	Máximo de 40%	Até 44%
Matéria Orgânica	Mínimo de 40%	Até 36%
Nitrogênio total	Mínimo de 1%	Até 0,9%
Relação C/N	Máximo de 18/1	Até 21/1

FONTE: IPT (2000)

Segundo KIEHL (1998) a maturidade do composto não deve ser confundida com qualidade. Maturidade é o resultado de uma correta decomposição microbiana da matéria orgânica, originando nutrientes e húmus. Um composto de qualidade, além de ter perfeita maturidade, deve apresentar características e propriedades que não torne o produto inadequado para o uso agrícola. Conseqüentemente, um composto pode estar perfeitamente maturado, mas ser condenado por não ter as qualidades exigidas para um fertilizante orgânico com bom valor agrícola.

3.8 Utilização do Composto Orgânico

A qualidade do composto orgânico depende das características da matéria-prima e do processo utilizado. Se a matéria-prima contiver algum contaminante químico ou tóxico, este estará presente no produto final, independentemente do processo. Porém, há casos, como ocorre na compostagem do lixo urbano em bioestabilizadores, em que a fração orgânica, no início do processo, não está contaminada, mas, em virtude do seu longo contato, durante a digestão, com pilha ou com partículas de metais, tintas, resinas, etc. sob altas temperaturas e sob o efeito de ácidos e solventes orgânicos liberados, essa matéria orgânica estará obviamente contaminada e, portanto, imprópria para o uso como

fertilizante na produção de alimentos. Porém é bom enfatizar que é possível produzir um composto orgânico, mesmo com resíduos urbanos, sem que o produto final esteja contaminado por metais ou outras substâncias tóxicas. Uma vez confirmada a ausência de contaminantes no produto final, este pode ser utilizado irrestritamente, como: na produção de frutas, legumes e grãos, em programas de reflorestamento de parques e jardins, na recuperação de áreas degradadas (mineração, aterro sanitário), no controle de erosão (PEREIRA NETO, 1992).

Um composto, para ser considerado seguro bacteriologicamente, deve apresentar níveis indetectáveis de *salmonella* e contagem inferior a cem (100) *E. coli* e estreptococos por grama de composto (BLEY Jr., 1998). Segundo WHITE *et al.* (1995) a matéria orgânica fresca apresenta 3×10^3 coliformes fecais por grama e 2×10^5 estreptococos fecais por grama.

Segundo PEREIRA NETO & LELIS (2000) o uso de fertilizante orgânico natural obtido através da compostagem, apresenta inúmeras vantagens que não são conseguidas com o uso de fertilizantes químicos, como:

- exerce um efeito tampão no solo e capacidade de troca catiônica (CTC) pela sua elevada área de superfície;
- atua como fonte de cátions (cálcio, potássio, magnésio, etc.) e de micronutrientes, além de ânions, fosfatos, sulfatos, etc.;
- exerce efeitos diretos no crescimento dos vegetais: aumentando a absorção de calor no solo, a permeabilidade das membranas à absorção de nutrientes, a atividade enzimática e a fotossíntese, pode atuar como receptor de elétrons e no fornecimento de vitaminas, substâncias promotoras do crescimento vegetal e de antibióticos (GOUIN e SKANKS, 1984);
- aumenta a permeabilidade à absorção de nutrientes, a atividade enzimática e a fotossíntese dos vegetais;
- atua como elemento de fixação (complexação e quelação¹) de elementos metálicos (nutrientes e metais pesados) e de formação de complexos húmus-argilo-minerais;
- atua na retenção de nutrientes, agindo como reservatório de nitrogênio, fósforo e enxofre, que fazem parte de sua constituição química;

¹ Quelados e complexos organometálicos são componentes igualmente importantes que formam complexos estáveis com os íons metálicos, reduzindo a absorção pelas plantas (KIEHL, 1998).

- favorece as condições físicas dos solos, como aglutinação e estabilidade dos agregados;
- aumenta a capacidade de retenção de água e de permeabilidade do solo;
- reduz os efeitos da erosão e suas conseqüências;
- exerce ação protetora e atua como fonte de nutrientes para os microrganismos do solo;
- exerce efeito controlador sobre muitas doenças e pragas de plantas.

O composto orgânico no estado de humificação não constitui um elemento estranho ao ecossistema dos solos e torna-se muito mais compatível aos mecanismos de adsorção do sistema radicular das plantas (liberando gradativamente os nutrientes fixados) do que os fertilizantes químicos que ainda são vulneráveis à lixiviação. Dependendo da cultura e do tipo de solo, a aplicação do composto orgânico se dá em taxas que vão de 15 a 30 toneladas por hectare (PEREIRA NETO, 1992).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Introdução

A fase experimental da pesquisa foi realizada no Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA) da Universidade Federal de Viçosa – MG.

Foram montados e monitorados cinco experimentos, com diferentes relações C:N, obtidas com a mistura de material vegetal (grama) e serragem à fração orgânica do lixo domiciliar proveniente da Usina de Triagem e Compostagem do município de Coimbra – MG. Para estes experimentos adotou-se o processo LESA de compostagem, no qual a aeração é realizada através do reviramento manual da massa de compostagem (item 3.4).

4.2 Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas na montagem dos experimentos foram:

- 1) A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos provenientes da usina de triagem e compostagem de Coimbra (MG).

O município de Coimbra – MG possui 6.443 habitantes, sendo 3.408 moradores na zona urbana e 3.035 na zona rural (IBGE, 2000). Segundo BRITO (2000) a produção média de resíduo urbano é de 1.449 kg/dia, sendo 52% de matéria orgânica.

Este município possui uma usina de compostagem implantada pela UFV/LESA, onde se faz a triagem e depois de separados os recicláveis, se procede a compostagem da fração orgânica pelo método LESA de compostagem (BRITO, 2000).

Para a montagem do experimento a matéria orgânica após ser triada, foi levada para o Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental – LESA em um caminhão caçamba, e descarregada no pátio de compostagem, onde foram montadas as pilhas.



FIGURA 4.1 – Chegada do resíduo orgânico no pátio de compostagem do LESA (a); descarregamento do resíduo orgânico (b e c); e resíduo orgânico após triagem (d).

- 2) Serragem, obtida da marcenaria da Universidade Federal de Viçosa.
- 3) Material vegetal (grama) resultante da capina dos jardins da mesma universidade.

4.3 Montagem dos Experimentos

4.3.1 Mistura do Material para Preparação das Pilhas

Para este experimento foram montadas, simultaneamente, quatro pilhas com diferentes concentrações de C:N obtidas a partir da mistura de serragem e grama ao resíduo orgânico urbano e uma pilha contendo apenas resíduo orgânico urbano. Baseado em trabalhos desenvolvidos previamente no LESA, nos quais foram obtidos péssimos resultados para as misturas nas proporções de 40, 50 e 60% de material auxiliar, foram

estabelecidas as seguintes proporções: 15 e 30% de material auxiliar (serragem e grama). A mistura foi feita manualmente com a utilização de carrinhos de mão, enxadas e pás.



FIGURA 4.2 – Mistura do material auxiliar (serragem) ao resíduo orgânico.

De acordo com a mistura e as proporções, as pilhas foram designadas pelas seguintes siglas:

- a) PLSR (30%): pilha composta por 30% em peso de serragem e 70% de resíduo orgânico;
- b) PLSR (15%): pilha composta por 15% em peso de serragem e 85% de resíduo orgânico;
- c) PLGR (30%): pilha composta por 30% em peso de grama e 70% de resíduo orgânico;
- d) PLGR (15%): pilha composta por 15% em peso de grama e 85% de resíduo orgânico;
- e) PLR: pilha somente constituída por resíduo orgânico (experimento testemunha).

A pilha testemunha utilizada neste experimento foi mantida sob as mesmas condições das demais, com exceção do pátio onde foi montada, visto ter sido utilizada também para um outro experimento, que era coberto. Esta decisão foi tomada para racionalizar os custos, visto que vários resultados de pesquisas do LESA, efetuados nos últimos dez anos, mostram que as condições ambientais externas não afetam a atividade

biológica no interior da leira. No caso deste experimento o único parâmetro que apresentou variações da PLR com relação ao comportamento das pilhas de resíduos orgânicos submetidas ao processo LESA de compostagem já monitoradas neste laboratório foi o teor de umidade, como pode ser visto na TABELA 4.1. Porém, segundo LELIS (1998) mesmo quando o teor de umidade se encontra próximo a valores extremos (máximo e mínimos), a atividade microbiana não para.

TABELA 4.1: Parâmetros determinados em pilhas submetidas ao processo LESA de compostagem, no dia da montagem e no dia 90.

PARÂMETROS	PERÍODO DE MONITORAMENTO (DIAS)					
	0			90		
	PLR	PLR*	PLR**	PLR	PLR*	PLR**
Densidade (g/l)	473,5	362,1	-	516,67	578,1	-
Sólidos Voláteis (%)	43,8	53,5	76,12	21,87	22,0	45,83
Teor de Umidade (%)	58,20	59,8	57,61	33,01	49,8	40,75
pH	6,1	4,6	5,19	9,5	8,9	8,67
Carbono Orgânico (%)	30,16	29,7	42,29	15,69	12,2	19,46
Nitrogênio Total (%)	1,47	1,22	1,23	1,08	1,32	1,42
Relação C/N	20,52	24,3	32,63	14,53	9,2	13,74
E. fecais UFC/g	1×10^8	2×10^5	4×10^6	$< 10^2$	$< 10^2$	$< 10^2$

* PLR – pilha de resíduo orgânico utilizada como testemunha deste experimento.

** PLR – pilha de resíduo orgânico utilizada no experimento realizado por LELIS (1998).

*** PLR – pilha de resíduo orgânico utilizada no experimento realizado por GOUVÊA (1995).

4.3.2 Construção das Pilhas

Após a mistura do material as pilhas foram montadas manualmente. Estas pilhas foram construídas em forma cônica, com valores médios de 2,00m de diâmetro de base e 0,65m de altura. As pilhas não foram montadas com a altura de 1,0 a 1,60m como determinado pelo método utilizado, devido à falta de estabilidade do material utilizado,

que não permitiram a montagem de pilhas com alturas superiores. Este fato, porém foi compensado, visto que o volume utilizado ultrapassa o mínimo recomendado para o processo.

Durante a construção das pilhas foi verificada a necessidade da correção da umidade daquelas que continham grama na sua constituição, pois a grama apresentava uma umidade muito baixa (19,55%), uma vez que a melhor porcentagem de umidade para o processo é de 55%.

4.3.3 Sistema de Aeração

No processo de compostagem adotado, a aeração das pilhas é realizada através do reviramento do material. Como as pilhas do presente trabalho apresentavam um volume pequeno de material, o reviramento foi manual.

4.3.4 Ciclo de Reviramento

No processo de compostagem por reviramento, versão LESA, este é realizado com o objetivo de fornecer oxigênio e dissipar altas temperaturas (>65°C). O reviramento foi realizado a cada três dias durante os 30 primeiros dias, seguindo com frequência de um reviramento semanal até o término da fase de degradação ativa. Na segunda fase do processo (fase de maturação) não houve mais reviramentos.

4.4 Técnicas de Coleta e Preparação de Amostras

Para a caracterização dos materiais foram coletadas amostras das matérias-primas (resíduo orgânico, grama e serragem) para determinações físicas e análises físico-químicas e químicas. Para as análises bacteriológicas foram coletadas amostras apenas do resíduo orgânico e da grama. Não foi feita análise bacteriológica da serragem, uma vez que foi assumido que esta não apresenta bactérias em concentrações significantes com relação ao resíduo orgânico.

Durante o período de monitoramento foram coletadas amostras das cinco pilhas de compostagem, que faziam parte do experimento.

4.4.1 Amostras para Análises Físico-Químicas e Químicas

As amostras das matérias-primas foram coletadas separadamente da massa de resíduo orgânico, serragem e grama em diferentes pontos para se obter uma amostra representativa. A amostra do resíduo orgânico foi coletada após a chegada do material no pátio de compostagem do LESA (UFV), e as amostras de grama e de serragem foram coletadas no dia da montagem das pilhas.

Na primeira fase do monitoramento, fase de degradação ativa, as amostras foram coletadas em pontos das pilhas com diferentes temperaturas (base, centro e topo) à meia profundidade, para garantir assim uma amostra mais representativa. Utilizou-se para a coleta, pás de jardinagem, e a amostra coletada foi armazenada em bandejas de plástico.

A amostra, depois de coletada e homogeneizada, foi submetida a um processo de separação manual das frações inertes (plásticos, metais, vidros, etc.) remanescentes da triagem. Essa amostra, denominada "*in natura*", por manter a umidade natural, foi utilizada para as análises físico-químicas (umidade e pH).

Para as análises químicas a amostra "*in natura*" foi colocada em estufa a $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 36 horas, para secar, sendo denominado o resultante, de amostra de laboratório.

4.4.2 Amostras para Análise Bacteriológica

As amostras para análise bacteriológica foram coletadas separadamente, utilizando pás de jardinagem e recipientes de vidro esterilizados, de maneira a minimizar a contaminação externa. Foram coletadas amostras em vários pontos das matérias primas (resíduo orgânico e grama) e nas pilhas de compostagem, após a montagem do experimento. Neste último caso, as amostras foram coletadas à meia altura e meia profundidade. As amostras eram acondicionadas em frascos que eram vedados e encaminhados ao laboratório para a execução imediata das análises.

4.5 Monitoramento

As pilhas de compostagem foram monitoradas através da determinação de parâmetros físicos, físico-químicos e químicos (temperatura, densidade, umidade, pH, sólidos voláteis, concentração de carbono biodegradável, nitrogênio, fósforo, potássio e ácido húmico) e bacteriológicas (*Streptococos* fecais). Foram observados também aspectos gerais como mudança da coloração do material, atração de vetores, produção de chorume e emissão de odor.

4.5.1 Determinações Físicas

4.5.1.1 Temperatura

A determinação da temperatura foi feita diariamente em três pontos da pilha (base, centro e topo) com o auxílio de sondas (par termoelectrico de cobre e níquel) que eram conectadas a um termômetro digital (RS modelo 206-3722).

4.5.2.2 Densidade

A determinação da densidade foi feita nas matérias-primas (resíduo orgânico, serragem e grama) separadamente. Após a montagem das pilhas, a determinação da densidade de cada pilha de compostagem foi feita mensalmente. Para esta determinação foi escolhida a seguinte metodologia: pesou-se em uma balança comercial (São Sebastião modelo SR15 com capacidade para 15 kg) um recipiente de volume conhecido vazio e se voltou a pesá-lo depois de preenchido com o material coletado em pontos aleatórios.

A determinação foi feita em triplicata e a densidade utilizada foi obtida da média aritmética dos três valores encontrados, através da expressão citada a seguir:

$$Densidade = \frac{P - T}{V} \quad (2.1)$$

Em que:

P – peso total

T – tara do recipiente

V – volume da amostra

4.5.2 Análises Físico-Químicas

As análises físico-químicas foram realizadas uma única vez nas amostras das matérias-primas antes da mistura. Após a montagem das pilhas as análises foram feitas semanalmente em cada pilha de compostagem.

4.5.2.1 Teor de Umidade

Para a determinação do teor de umidade a amostra coletada foi submetida a uma triagem e trituração para que ficasse mais homogênea. Em seguida foi pesado (balança “Precision” modelo PR 500) em frasco de porcelana aproximadamente 30,0g do material, com exceção apenas para a grama, para a PLGR (30%) e para a PLGR (15%) no início do processo, quando foi utilizado apenas 15,0g de amostra, devido ao grande volume de amostra necessário para se obter o peso desejado. Após a pesagem o material foi colocado em estufa (Gallenkamp modelo 2381) à $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por um período de 24 horas. Depois de seca, a amostra foi colocada em dessecador por 15 minutos para que esfriasse sem incorporar a umidade do ambiente e pesada novamente (APHA *et al.*, 1995).

O procedimento foi feito em duplicata e o teor de umidade foi obtido calculando-se a média aritmética dos valores encontrados pela expressão abaixo:

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{P_H - P_S}{P_H} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Em que:

P_H – peso da amostra úmida (g);

P_S – peso da amostra seca (g).

4.5.2.2 pH

A determinação do pH foi realizada empregando-se a mesma amostra “*in natura*” utilizada para a determinação do teor de umidade. Para esta determinação seguiu-se a metodologia proposta por PEREIRA NETO (1987) e explicitada a seguir:

- Pesar no becker (utilizando balança “Precision: modelo PR500) aproximadamente 10,0g da amostra;
- Adicionar 250ml de água destilada;
- Agitar a mistura por 3 minutos com o auxílio do bastão de vidro;
- Deixar a mistura descansar por 5 minutos
- Após o período de repouso, medir o pH da solução utilizando pHmetro digital – Quimis modelo Q400A – equipado com eletrodo combinado com referência interna de Ag/AgCl.

4.5.2.3 Teor de Sólidos Fixos e Voláteis

Para as determinações de sólidos fixos e voláteis foram utilizadas as amostras após a determinação de umidade (amostra de laboratório). Pesou-se aproximadamente 2,00g de amostra utilizando balança “Precision” modelo PR500. Após a pesagem colocou-se na mufla (mufla Quimis modelo Q318D24) por 2 horas a uma temperatura de $500^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$. Em seguida a amostra foi colocada no dessecador por aproximadamente 40 minutos para esfriar e pesada novamente (APHA *et al.*, 1995).

O procedimento foi feito em duplicata e o teor de sólidos voláteis e sólidos fixos foram obtidos da média aritmética dos valores encontrados pelas expressões abaixo:

$$SV(\%) = \frac{P_I - P_F}{P_I} \cdot 100 \quad (2.3)$$

$$SF(\%) = 100 - \%SV \quad (2.4)$$

Em que:

SV – sólidos voláteis;

P_I – peso inicial da amostra (g);

SF – sólidos fixos;

P_F – peso final da amostra (g).

4.5.3 Análises Químicas

As amostras de laboratório, preparadas mensalmente, foram acondicionadas em sacos plásticos vedadas e etiquetadas. Ao final do processo de compostagem, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV) para determinação da concentração de nitrogênio, pelo método Micro Kjeldahl; carbono orgânico total, através do método de WALKLEY-BLACK; fósforo e potássio, através da extração nitroperclórica; e ácido húmico, de acordo com o método desenvolvido pela International Humic Substance Society – IHSS (SWIFT, 1996).

4.5.4 Análise Bacteriológica

4.5.4.1 Determinação de *Streptococcus* fecais

A determinação de estreptococos fecais foi realizada semanalmente nas pilhas de compostagem. Para esta determinação foi empregada a seguinte metodologia (KENNER *et al.*, 1961):

- Pesar aproximadamente 1,0 g da amostra em um erlenmeyer, utilizando balança “Precision” modelo PR500;
- Adicionar 99,0 ml de solução de Ringer;
- Agitar o material e deixar repousar por aproximadamente 10 minutos;
- Preparar as diluições necessárias em vidros universais contendo 9ml de solução de Ringer;
- Filtrar 1ml da amostra na diluição desejada;
- Colocar as membranas em placas de petri preparadas com o meio de cultura seletivo (KF *Streptococcus* Agar);
- Colocar as placas na incubadora a $37^{\circ} \pm 2^{\circ}$ por 48 horas;
- Fazer a contagem das colônias de *Streptococcus fecalis*, bactérias que apresentarem coloração violeta escura.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Introdução

As matérias-primas utilizadas foram caracterizadas antes da mistura para a montagem das pilhas de compostagem e os resultados das determinações e análises encontram-se na TABELA 5.1.

TABELA 5.1: Características das matérias-primas utilizadas

Parâmetro Avaliado	Valores		
	Resíduo Orgânico	Serragem	Grama
Densidade (kg/m ³)	473,50	222,50	26,80
Teor de Umidade (%)	58,20	32,40	19,55
pH	6,1	4,7	7,9
Sólidos Voláteis (%)	43,80	99,00	91,07
Nitrogênio Total (%)	1,47	0,22	1,31
Carbono Biodegradável Total (%)	30,16	64,99	46,34
Fósforo (%)	0,43	0,03	0,14
Potássio (%)	0,87	0,12	0,37
Ácido Húmico (%)	0,33	1,05	1,89
Relação C/N	21:1	295:1	41:1
Estreptococos fecais (UFC/g)	14 x 10 ⁷	n.d.	35 x 10 ³

n.d. = não detectado

As matérias-primas, segundo a bibliografia especializada, apresentaram resultados normais para os tipos de materiais utilizados, confirmando a relação C/N muito elevada da serragem e uma grande contaminação do resíduo orgânico. Foram exceções os resultados para ácido húmico, onde se esperava valores próximos de zero, como os obtidos para a fração orgânica do lixo (0,01) e cavaco de madeira (0,0) em pesquisas realizadas por GOUVÊA (1995).

Estes resultados, portanto, não correspondem à realidade, sendo provavelmente falhas no método de determinação. No método utilizado para a extração dos ácidos húmicos, ocorre também a extração de proteínas, carboidratos e lignina, levando-se a interpretações errôneas dos resultados, sendo o mesmo eficiente para o material já degradado, que não apresenta mais açúcares e proteínas livres (EGREJA FILHO, 1993).

5.2 Monitoramento

5.2.1 Determinações Físicas

5.2.1.1 Temperatura

A variação da temperatura nas pilhas de compostagem e a temperatura ambiente foram registradas diariamente durante o experimento e os seus valores estão apresentados nas FIGURAS 5.1 a 5.5.

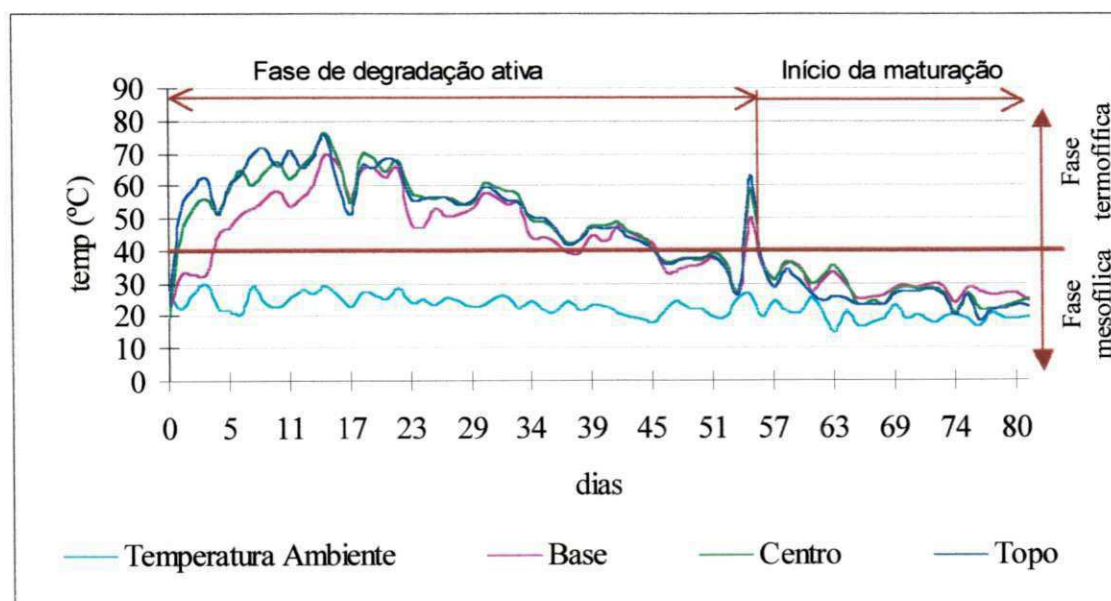


FIGURA 5.1: Variação da Temperatura na pilha constituída por resíduo orgânico urbano – PLR.

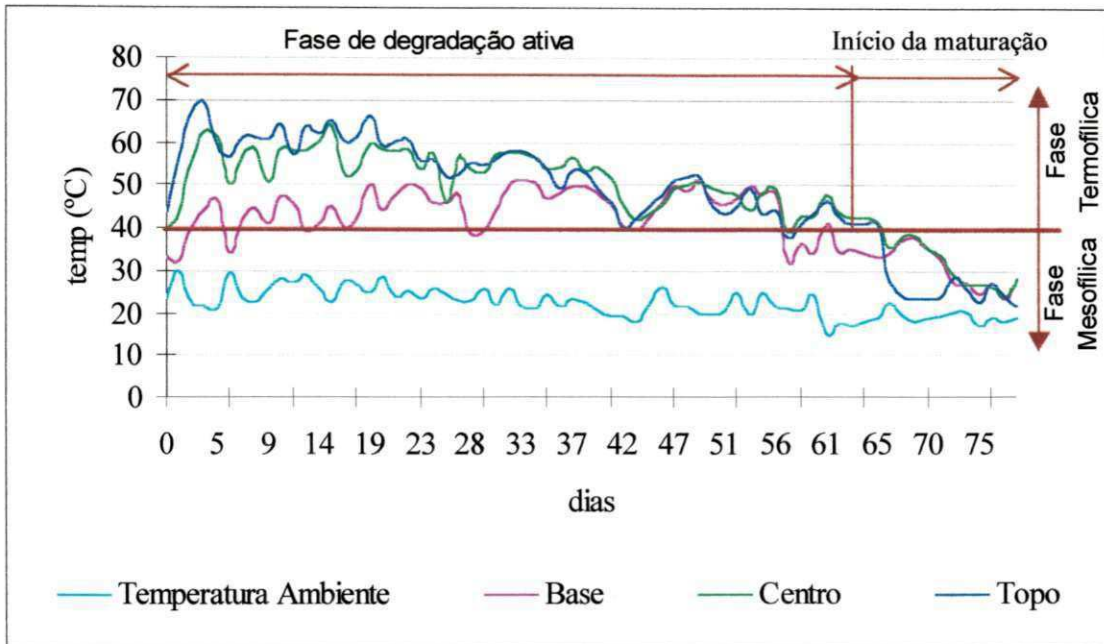


FIGURA 5.2: Variação da Temperatura na pilha composta por 30% em peso de serragem e 70% de resíduo orgânico urbano – PLSR (30%)

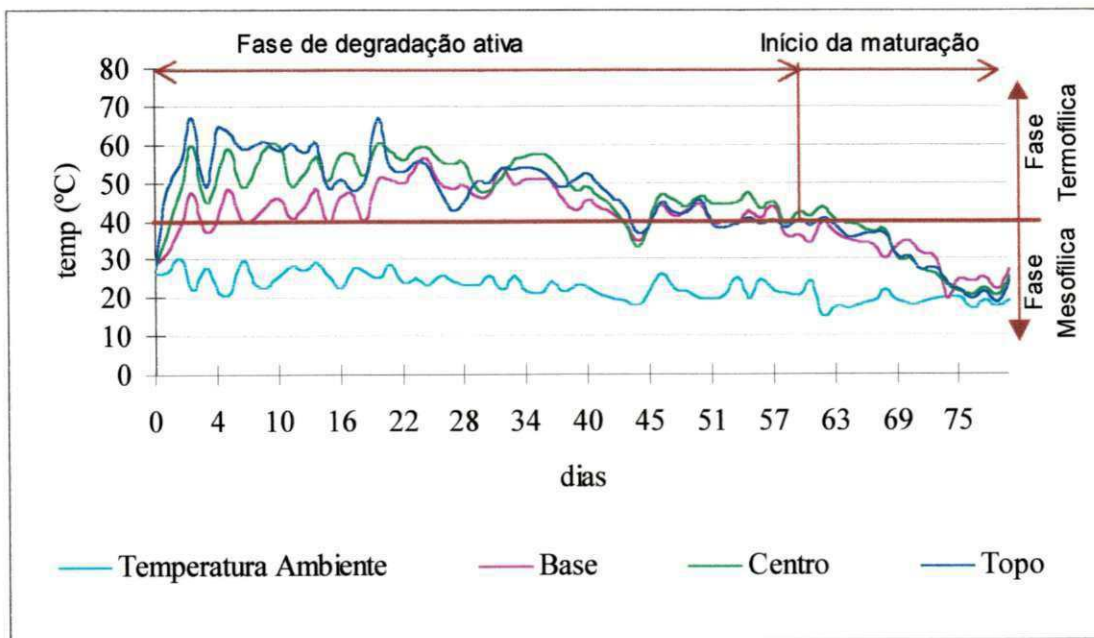


FIGURA 5.3: Variação da Temperatura na pilha composta por 15% em peso de serragem e 85% de resíduo orgânico urbano – PLSR (15%)

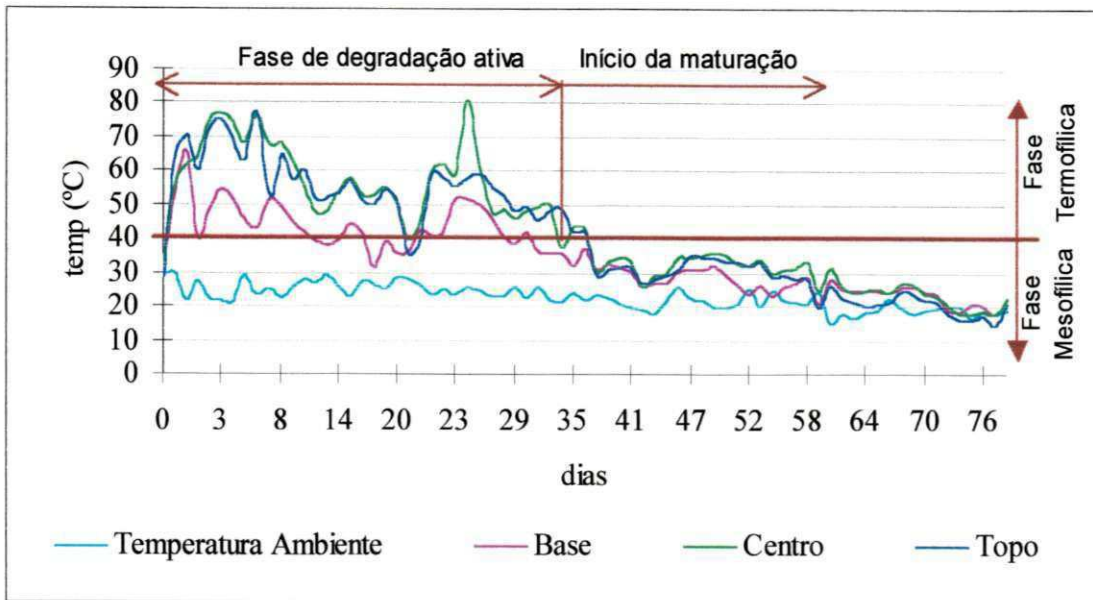


FIGURA 5.4: Variação da Temperatura na pilha composta por 30% em peso de grama e 70% de resíduo orgânico urbano – PLGR (30%)

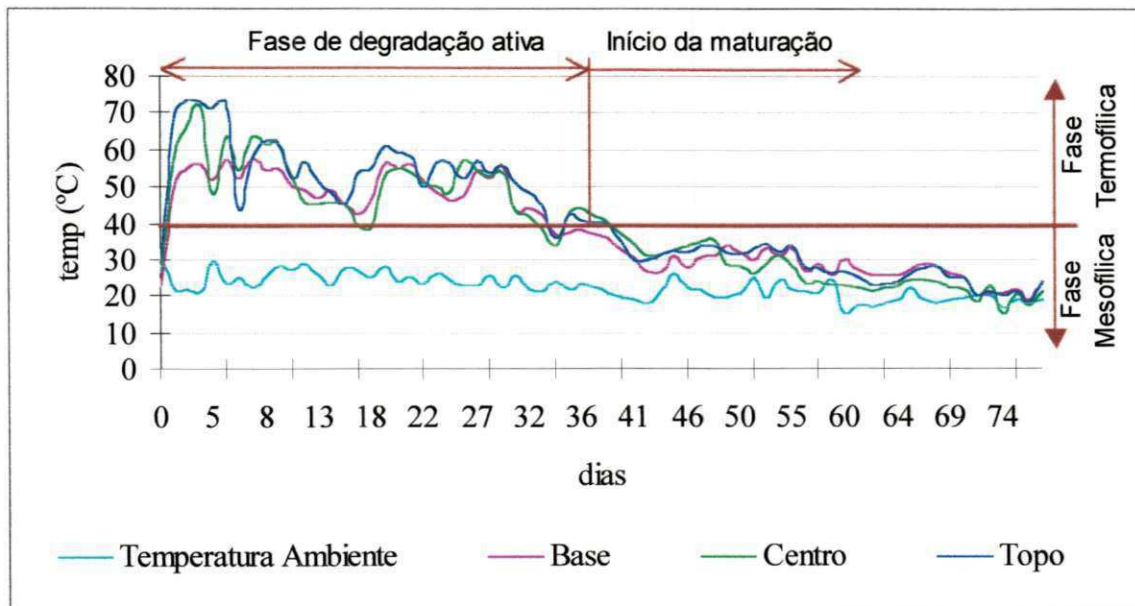


FIGURA 5.5: Variação da Temperatura na pilha composta por 15% em peso de grama e 85% de resíduo orgânico urbano – PLGR (15%)

As pilhas, quando montadas, apresentavam temperaturas próximas à ambiente (28°C) e atingiram temperaturas na faixa termofílica (50 a 60°C) em um período de 15 a 48 horas. As que continham grama na sua composição atingiram esses valores mais

rapidamente, cerca de 15 horas, tempo este bastante inferior ao esperado, de 2 a 5 dias (PEREIRA NETO, 1987).

A pilha testemunha manteve temperatura na faixa termofílica por um período de 57 dias, tempo este inferior ao esperado (70 a 90 dias) segundo PEREIRA NETO (1987), podendo isto ter ocorrido devido ao baixo teor de umidade mantido nesta pilha, variando de 32 a 47% (FIGURA 5.17).

As pilhas PLSR (30%) e PLSR (15%) mantiveram temperatura na faixa termofílica (40 a 70°C) por um período de 60 a 65 dias, o que mostra que apesar do material apresentar uma relação C/N alta no início da compostagem a fase de degradação ativa nos dois experimentos ocorreu dentro do período citado por PEREIRA NETO (1996) de 70 a 90 dias, não comprometendo o tempo de compostagem.

As pilhas PLGR (30%) e PLGR (15%) atingiram temperaturas acima de 70°C no sexto dia, as quais, segundo BEFFA *et al.* (1996), são indesejáveis no processo de compostagem por diminuírem a biodiversidade, diminuindo assim, a atividade dos fungos termofílicos. Para diminuir a temperatura, as pilhas foram transformadas em leiras, por estas apresentarem uma superfície de exposição maior, e conseqüentemente perder mais calor. Permanecendo neste formato até o décimo oitavo dia, quando as mesmas apresentaram temperaturas abaixo de 55°C, voltando ao formato inicial para evitar que a temperatura continuasse a cair, uma vez que a temperatura deve ser controlada entre 40 e 65°C em toda a massa de compostagem durante um período mais longo possível (PEREIRA NETO, 1987).

A fase de degradação ativa das pilhas PLGR (30%) e PLGR (15%) duraram de 36 a 40 dias, quando normalmente dura de 70 a 90 dias na compostagem da fração orgânica do resíduo urbano (PEREIRA NETO, 1996). Isto nos sugere que a adição de grama nestas proporções beneficiou o tempo de compostagem, reduzindo-o em cerca de 30 dias.

5.2.1.2 Densidade

Na FIGURA 5.6 pode ser verificada a variação da densidade do material sob compostagem ao longo do processo.

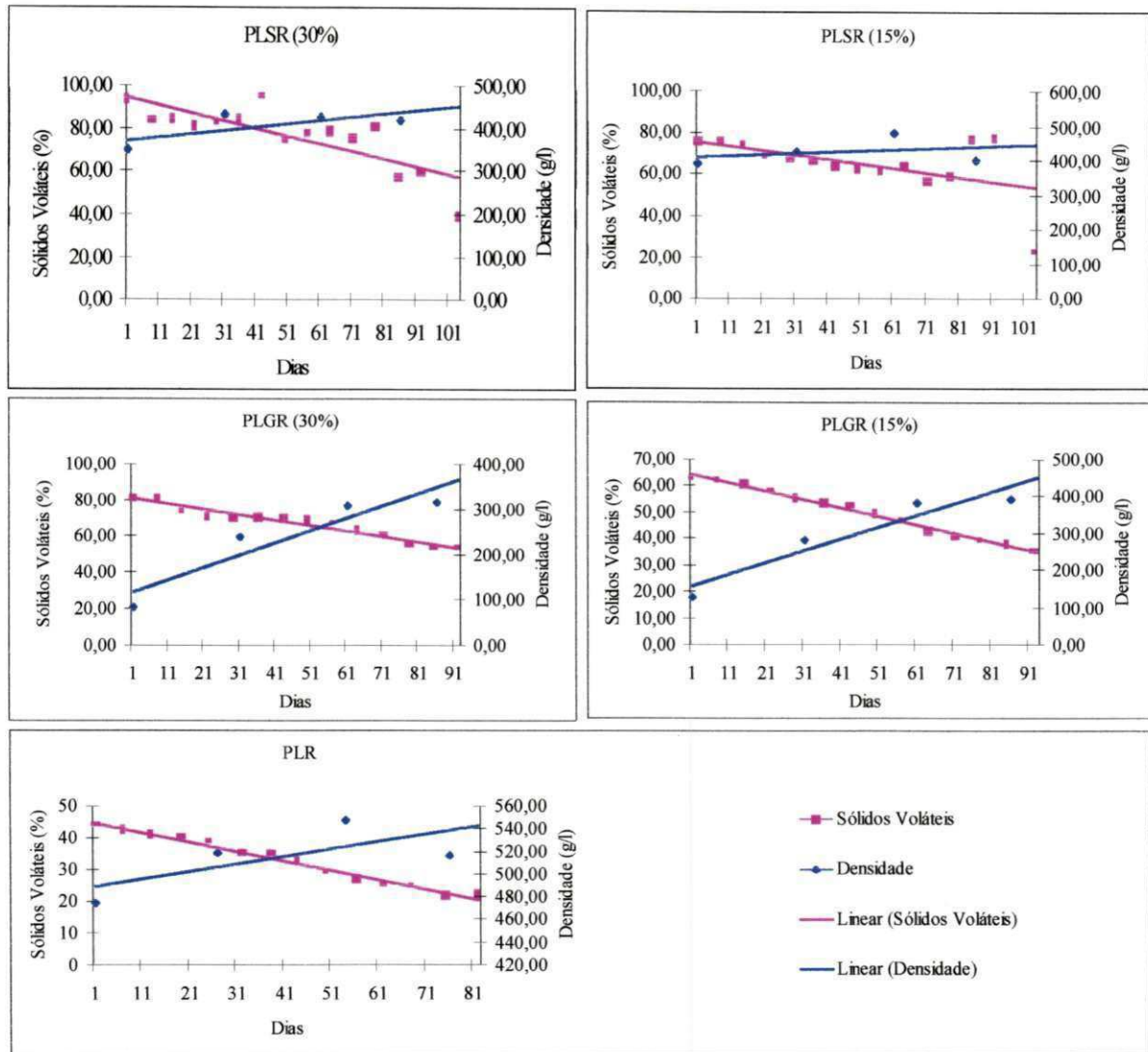


FIGURA 5.6: Variação da Densidade e Sólidos Voláteis nas Pilhas de Compostagem

Observa-se que em todos os experimentos houve um aumento gradual da densidade, atingindo um valor médio entre 500 g/l (PLR) e 300 g/l (PLGR 30%), o qual deve-se à mineralização e humificação da matéria orgânica.

A PLR apresentou um acréscimo de densidade de 16%, o qual foi muito baixo quando comparado aos resultados obtidos por LELIS (1998) de cerca de 60% para as pilhas de resíduo orgânico urbano mantidas na faixa de umidade de 30 a 40% (faixa mantida na PLR). A PLR chegou ao final do processo com densidade próxima à encontrada pelo autor para as pilhas mantidas na mesma faixa de umidade, porém no início do processo a PLR apresentou uma densidade cerca de duas vezes maior que as das pilhas monitoradas por LELIS (1998), provavelmente pelo fato desta apresentar uma umidade maior, cerca de 60%.

As pilhas que continham serragem em sua composição iniciaram o processo de compostagem com densidade próxima a encontrada por LELIS (1998) para as pilhas de resíduo orgânico urbano mantidas na mesma faixa de umidade (50 a 60%), porém apresentou um acréscimo da densidade (22%) inferior ao resultado obtido pelo autor, cerca de 50%. O que leva a acreditar que a adição de serragem ao resíduo orgânico urbano interferiu no acréscimo da densidade.

As pilhas que continham grama apresentaram uma densidade inicial muito baixa (100 g/l, cerca de quatro vezes menor que as demais), devido ao fato da grama não ter sido triturada antes da mistura com o resíduo orgânico urbano. Isto justifica um acréscimo tão elevado na densidade (68%) após o peneiramento do material ao final do processo.

5.2.2 Análises Físico-Químicas

5.2.2.1 Teor de Umidade

Os resultados obtidos durante o monitoramento encontram-se representados na FIGURA 5.7.

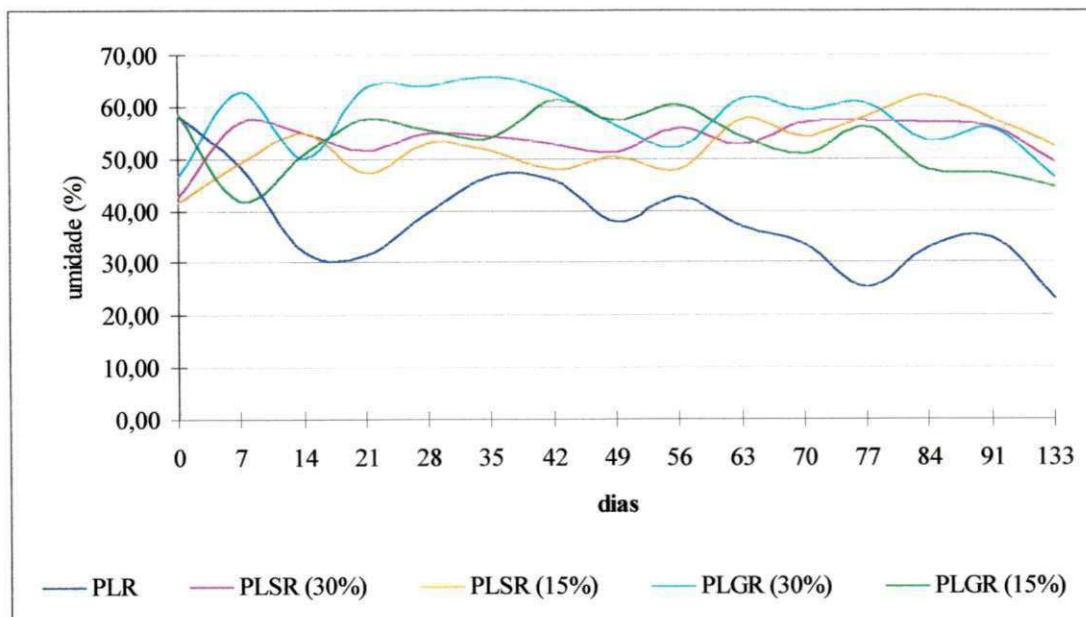


FIGURA 5.7: Variação do Teor de Umidade nas Pilhas de Compostagem

O teor de umidade da PLR ficou abaixo da faixa desejada, em torno de 55%, segundo PEREIRA NETO (1996), variando de 25 a 48% ao longo do processo. Isto ocorreu, provavelmente, devido às elevadas temperaturas, em torno de 70°C, registradas na mesma durante a fase de degradação ativa, e que proporcionaram liberação de vapor d'água em proporções maiores do que à água fornecida durante os reviramentos. Porém, apesar do baixo teor de umidade, esta pilha apresentou uma boa redução de sólidos voláteis (49%) quando comparado aos experimentos monitorados por LELIS (1998), nos quais foi obtida uma redução de aproximadamente 52% nos experimentos mantidos na faixa ótima do teor de umidade (45 a 55%).

As pilhas PLSR (30%) e PLSR (15%) apresentaram umidade satisfatória durante a fase de degradação ativa, variando de 51 a 58%. Porém, não apresentaram queda do teor de umidade na segunda fase do processo, na qual não foi feita sua correção. Nesta fase, a temperatura média permaneceu próxima a 30°C (FIGURAS 5.18 e 5.19), a qual não foi suficiente para estimular a liberação de vapor d'água com a conseqüente queda do teor de umidade. Segundo a Legislação do Brasil (IPT, 2000) um composto maturado não deve apresentar teor de umidade acima de 44%. Portanto é necessário a correção da umidade deste material para o uso agrícola.

A PLGR (30%) e a PLGR (15%) apresentaram umidade acima da faixa desejada (45 a 55%), variando de 52 a 66% durante a fase de degradação ativa. A PLGR (30%) permaneceu com o teor de umidade acima de 60% por um período de aproximadamente 28 dias, devido a um excesso de água fornecida durante o reviramento, com a finalidade de evitar o rápido ressecamento da camada mais externa da pilha (o que não foi possível de ser evitado). O material destas pilhas chegou ao final do processo com umidade próxima a 44%, máxima tolerada pela Legislação do Brasil (IPT, 2000).

5.2.2.2 pH

Os resultados das variações de pH são apresentados na FIGURA 5.8. Observa-se que o pH da PLR que era inicialmente ácido (6,1) estava dentro dos valores iniciais da compostagem, entre 5 e 6, citados por PEREIRA NETO (1987). Nesta pilha, o pH apresentou um aumento gradual durante a fase de degradação ativa, atingindo um máximo de 9,6 no final desta fase. Esse valor elevado não compromete a compostagem,

pois segundo experimentos realizadas no LESA (PEREIRA NETO, 1996) a compostagem pode ser desenvolvida numa faixa de pH entre 4,5 e 9,5.

Na segunda fase do processo, o pH da PLR apresentou um decréscimo, chegando a 7,8 ao final do processo. Segundo diversos autores (GOLUEKE, 1977 e STENTIFORD, 1991) são considerados satisfatórios valores entre 7,5 e 9,0 para o pH do final do processo.

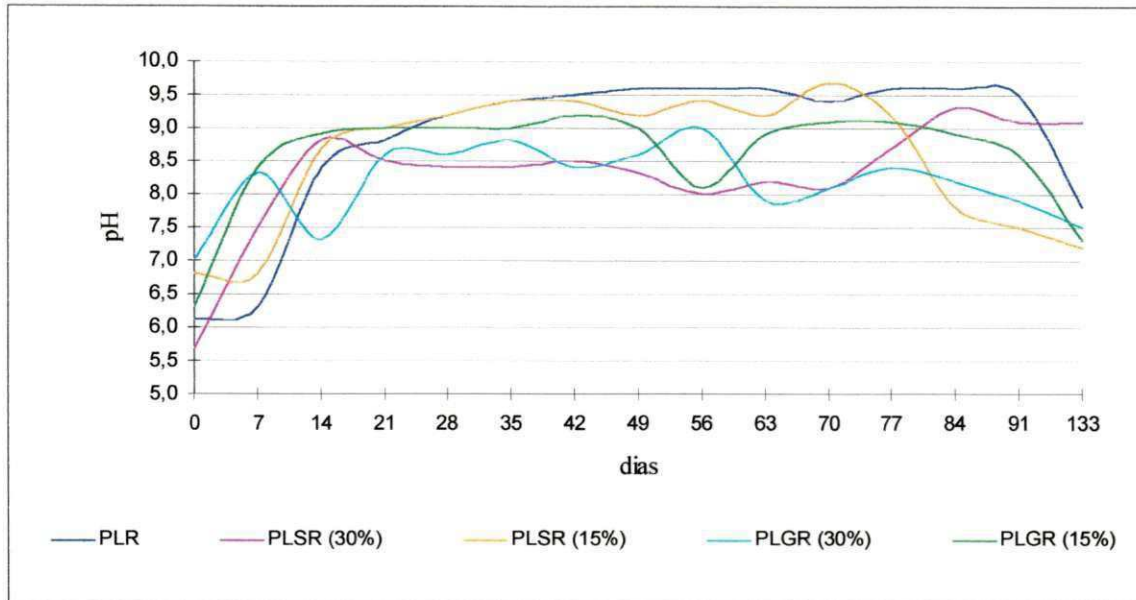


FIGURA 5.8: Variação do pH nas Pilhas de Compostagem

As pilhas PLGR (30%), PLGR (15%) e PLSR (15%), apresentaram comportamentos semelhantes ao da pilha testemunha: valores máximos entre 9,0 e 9,7 e chegando ao final do processo na faixa 7,2 e 7,5. Apesar de serem valores um pouco abaixo da faixa satisfatória (7,5 a 9,0), este poderia ser utilizado na agricultura, pois está dentro do pH mínimo de 6,0 sugerido pelo IPT (2000). Entretanto, para o uso agrícola deve também satisfazer outras condições, como a relação C/N, umidade, etc.

A PLSR (30%) iniciou o processo com um pH de 5,7, que apesar de ser mais baixo que o pH das demais pilhas, ainda está dentro da faixa de pH inicial para a compostagem. Esta pilha atingiu um pH máximo de 9,3 estabilizando em 9,1.

Os resultados sugerem que a mistura de grama e de serragem com o resíduo orgânico urbano nas proporções utilizadas (com exceção da PLSR 30%), não exerceram influência significativa na variação do pH. A PLSR (30%) apesar de não ter tido o mesmo comportamento das demais pilhas, não apresentou valores que comprometessem a compostagem. Todos os experimentos chegaram ao final do processo com valores

considerados satisfatórios (entre 7,5 e 9,0), segundo GOLUEKE (1977) e STENTIFORD (1991).

5.2.2.3 Teor de Sólidos Voláteis

O teor de sólidos voláteis apresentou uma redução considerada satisfatória durante o processo de compostagem em todos os experimentos monitorados, com exceção da PLSR (15%), a qual deve ser em torno de 40% segundo PEREIRA NETO (1996)

A variação do teor de sólidos voláteis ao longo do período de compostagem encontra-se representado na FIGURA 5.9.

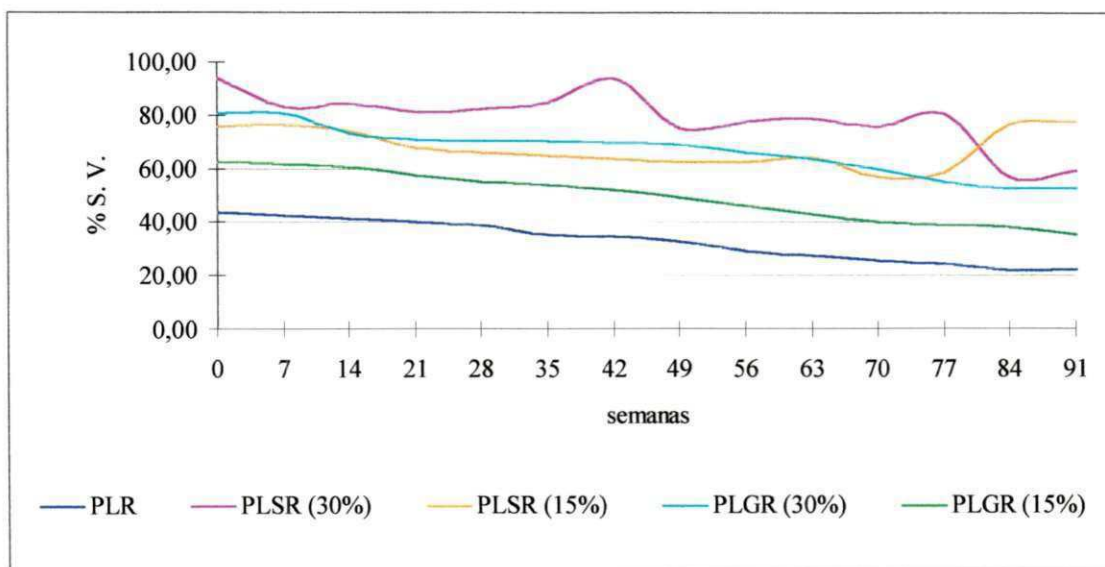


FIGURA 5.9: Variação do Teor de Sólidos Voláteis nas Pilhas de Compostagem

Os experimentos com a serragem apresentaram valores considerados discrepantes no teor de sólidos voláteis devido à heterogeneidade deste. Em algumas amostras houve um acréscimo, quando deveria ocorrer decréscimo deste parâmetro. Provavelmente uma melhor homogeneização da serragem, antes da mistura desta ao resíduo orgânico urbano, atenuaria esses valores discrepantes.

A PLR teve redução de 49% do teor de sólidos voláteis, valor este satisfatório, pois um processo de compostagem eficiente deve apresentar redução média de 40% do teor inicial (PEREIRA NETO, 1996).

As demais pilhas, com exceção da PLSR (15%), apresentaram uma redução de 39 a 44% de sólidos voláteis.

A PLSR (15%) não teve essa porcentagem de redução, sendo esta de apenas 22,40%. Porém, esperava-se que apresentasse uma redução maior que a PLSR (30%), por ter menor quantidade de serragem misturada ao resíduo. Este fato nos sugere que o material utilizado na PLSR (30%) era de mais fácil degradação, fazendo com que este apesar de conter maior porcentagem de serragem fosse mais eficiente. Acredita-se que um material homogêneo poderia garantir a mesma composição do material a ser misturado ao resíduo orgânico urbano, e assim obter resultados semelhantes em todas as pilhas.

5.2.3 Análises Químicas

5.2.3.1 Concentração de Nitrogênio

A FIGURA 5.10 apresenta a variação da concentração de nitrogênio total nos experimentos ao longo do monitoramento.

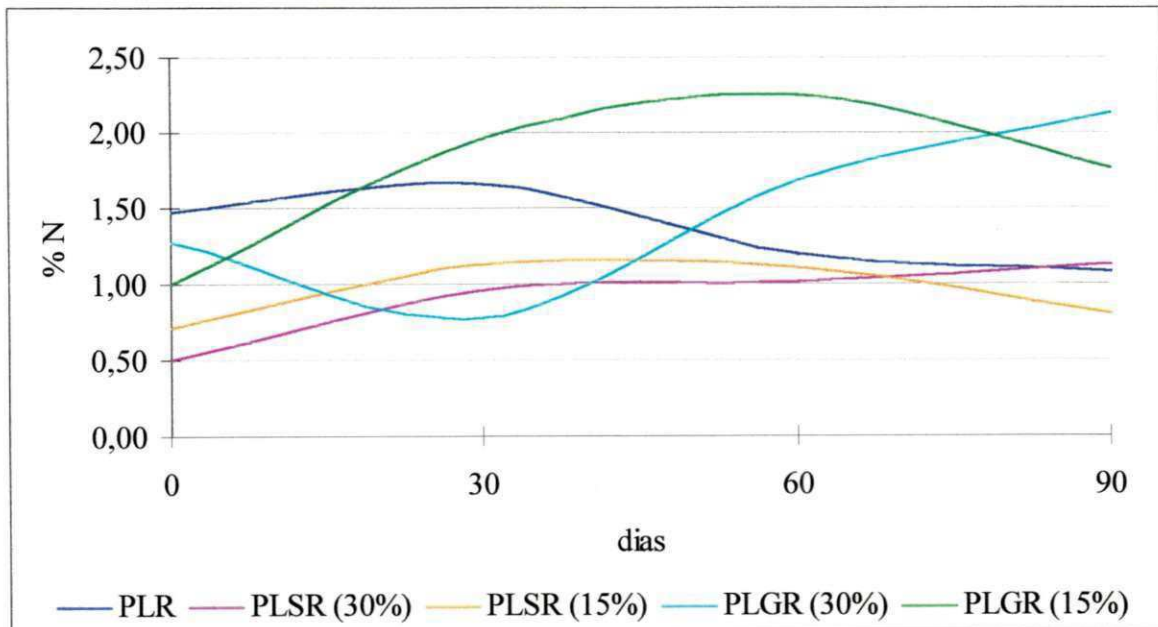


FIGURA 5.10: Variação da Concentração de Nitrogênio Total nas Pilhas de Compostagem

As pilhas que continham serragem apresentaram um aumento da concentração de nitrogênio de 126% na PLSR (30%) e de 11,25% na PLSR (15%) durante o processo de compostagem. A PLSR (30%) apresentou uma perda de massa de 85%, o que leva a acreditar que houve uma concentração de nitrogênio no composto, justificando o aumento excessivo de nitrogênio ocorrido nesta pilha. As pilhas PLGR (30%) e PLGR (15%) também apresentaram um aumento na concentração de nitrogênio de 68% e 76% respectivamente.

Na pilha testemunha ocorreu perda de nitrogênio de 26% ao longo do processo, provavelmente por volatilização da amônia, proporcionada pela alta temperatura associada a meios alcalinos (PEREIRA NETO, 1989).

As especificações da ABNT para compostos orgânicos admitem um mínimo de 1,0% e toleram 0,9% de nitrogênio total. Todos os experimentos apresentaram teores acima dos valores mínimos especificado pela ABNT.

5.2.3.2 Concentração de Carbono Orgânico Total

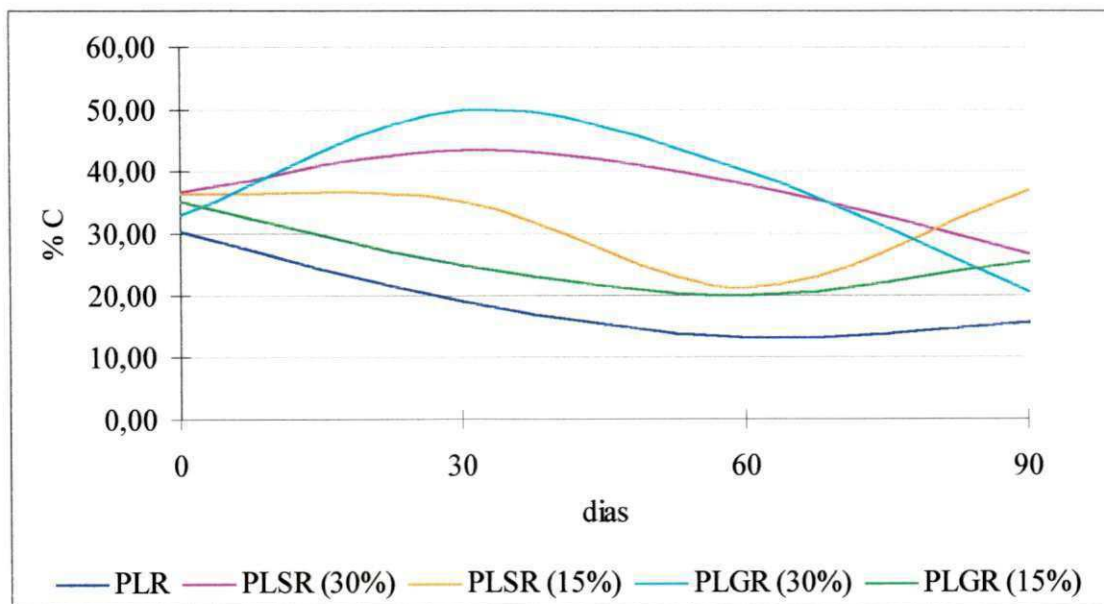


FIGURA 5.11: Variação da Concentração de Carbono Orgânico Total nas Pilhas de Compostagem

Em todos os experimentos houve redução das concentrações de carbono ao longo do processo de compostagem (FIGURA 5.11), devido à diminuição do conteúdo de

matéria orgânica (KIEHL, 1985). A PLR apresentou uma redução de 48% e nas demais pilhas a redução foi inferior, de 27 a 42%.

A PLSR (15%) apresentou eficiência maior do que a PLSR (30%), como era esperado, por ter uma menor quantidade de serragem, sendo a redução de carbono de 42 e 27% respectivamente.

A PLGR (30%) teve uma redução de 37,6%, superior à apresentada pela PLGR (15%), de 28,5%.

5.2.3.3 Concentração de Fósforo

As variações da concentração de fósforo durante o processo de compostagem de todos os experimentos estão apresentadas na FIGURA 5.12.

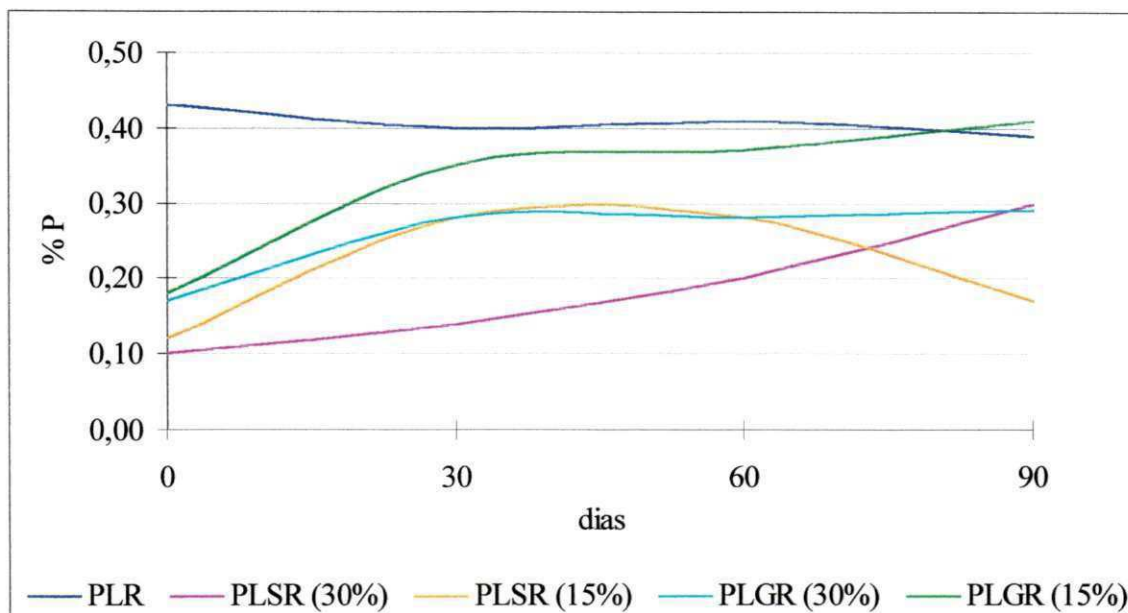


FIGURA 5.12: Variação da Concentração de Fósforo nas Pilhas de Compostagem

Todos os experimentos apresentaram um aumento de 5 a 23% da concentração de fósforo, com exceção do experimento testemunho (PLR) que não apresentou variação significativa ao longo do processo de compostagem.

Segundo KIEHL (1985) os valores finais encontrados estão inseridos numa faixa baixa de concentração (<0,5%).

A maior concentração de fósforo ao final do monitoramento ocorreu na PLGR (15%), a qual também apresentou um maior aumento desta concentração, indicando

assim, uma provável vantagem em se adicionar grama ao resíduo orgânico urbano, na proporção de 15%.

5.2.3.4 Concentração de Potássio

Durante o período de compostagem houve um aumento da concentração de potássio em todos os experimentos, este acréscimo variou de 5 a 57%.

A pilha que apresentou um maior acréscimo foi a PLSR (30%) que, como descrito no item 5.2.3.1, foi a pilha que apresentou uma maior perda de massa, concentrando assim os nutrientes.

Segundo a bibliografia os valores finais encontrados estão inseridos numa faixa de média concentração de potássio, valores entre 0,5 e 1,5% (FIGURA 5.13).

A maior concentração de potássio ao final do monitoramento ocorreu na PLR, indicando assim, que a adição do material (serragem ou grama) foi desfavorável ao acréscimo de potássio.

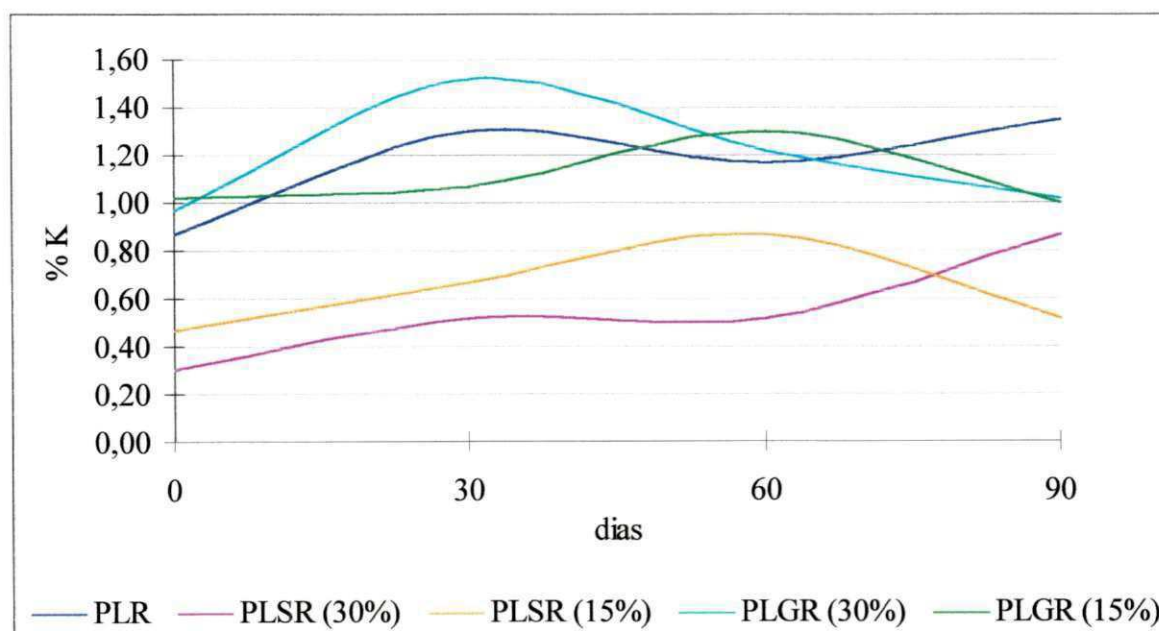


FIGURA 5.13: Variação da Concentração de Potássio nas Pilhas de Compostagem

5.2.3.5 Concentração de Ácido Húmico

A variação da concentração de ácido húmico ao longo do processo encontra-se apresentada na FIGURA 5.14.

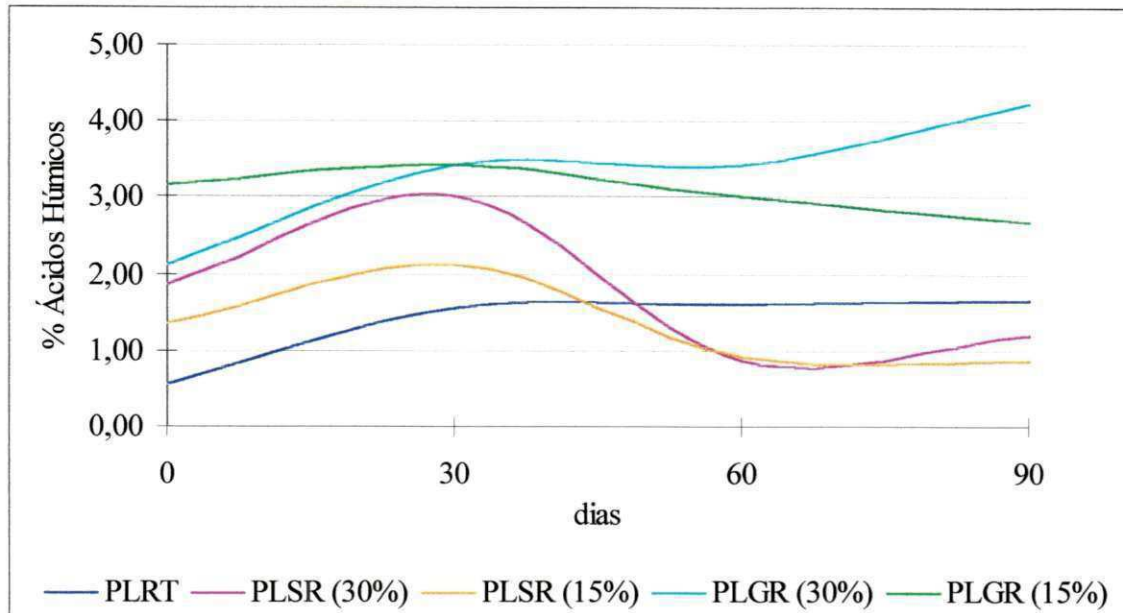


FIGURA 5.14: Variação da Concentração de Ácido Húmico nas Pilhas de Compostagem

O teor de ácido húmico foi determinado ao longo do processo de compostagem em todos os experimentos, mostrando um aumento no decorrer do processo apenas nas PLR e PLGR (30%). Nos demais experimentos não foram constatados os aumentos esperados com a humificação do material, provavelmente por falhas obtidas nas análises como descrito no item 5.1.

Todos os experimentos, com exceção da PLGR (30%), apresentaram concentração de ácidos húmicos, ao final do processo, inferior a concentração (4,20) encontrada por GOUVÊA (1995), utilizando a fração orgânica do resíduo sólido urbano, lodo e cavaco de madeira.

5.2.3.6 Relação C/N

Todos os experimentos apresentaram redução satisfatória da relação C/N, variando de 59,40 a 67,70% para as pilhas com mistura de material e uma redução 47% na pilha testemunha.

No decorrer do processo de compostagem, o conteúdo de matéria orgânica sofre uma diminuição, o que leva a uma redução do carbono orgânico (KIEHL, 1985). Segundo o mesmo autor o nitrogênio total aumenta, em virtude da mineralização, conseqüentemente, ocorre diminuição da relação C/N. Esta redução deve ser de 50 a 60%, considerando que a relação C/N inicial seja de 30 a 40/1 e a final menor que 15/1.

A variação da relação carbono/nitrogênio em cada experimento está apresentada na FIGURA 5.15.

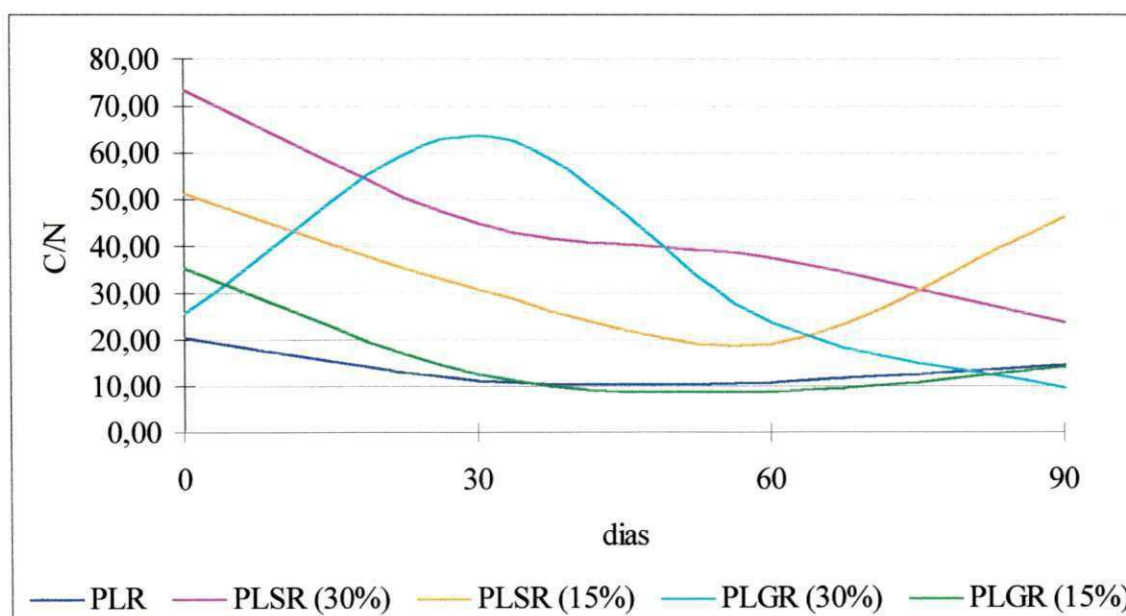


FIGURA 5.15: Variação da Relação C/N nas Pilhas de Compostagem

As pilhas PLR, PLGR (30%) e PLGR (15%) chegaram ao final do processo com uma relação C/N inferior a 15/1, refletindo assim um bom grau de estabilização (PEREIRA NETO, 1987).

Embora a PLSR (30%) e a PLSR (15%) tenham chegado ao final do processo com uma relação C/N superior a 15/1, estas apresentaram redução total da ordem de 67,70 e 62,40% respectivamente. O composto da PLSR (15%) apresentou uma relação

C/N de 19/1, valor tolerável para composto orgânico segundo a Legislação do Brasil (IPT, 2000).

A PLGR (30%), teve por volta do 30º dia, um aumento da relação C/N, devido à perda de nitrogênio, provavelmente por volatilização da amônia com a alta temperatura associada a meios alcalinos (PEREIRA NETO, 1989).

5.2.4 Análise Bacteriológica

5.2.4.1 Determinação de Estreptococos fecais

O processo de compostagem se mostrou eficiente quanto a sanitização do material em todos os experimentos, os quais chegaram ao final do processo com uma contagem de estreptococos fecais inferior a 100 UFC/grama (FIGURA 5.16).

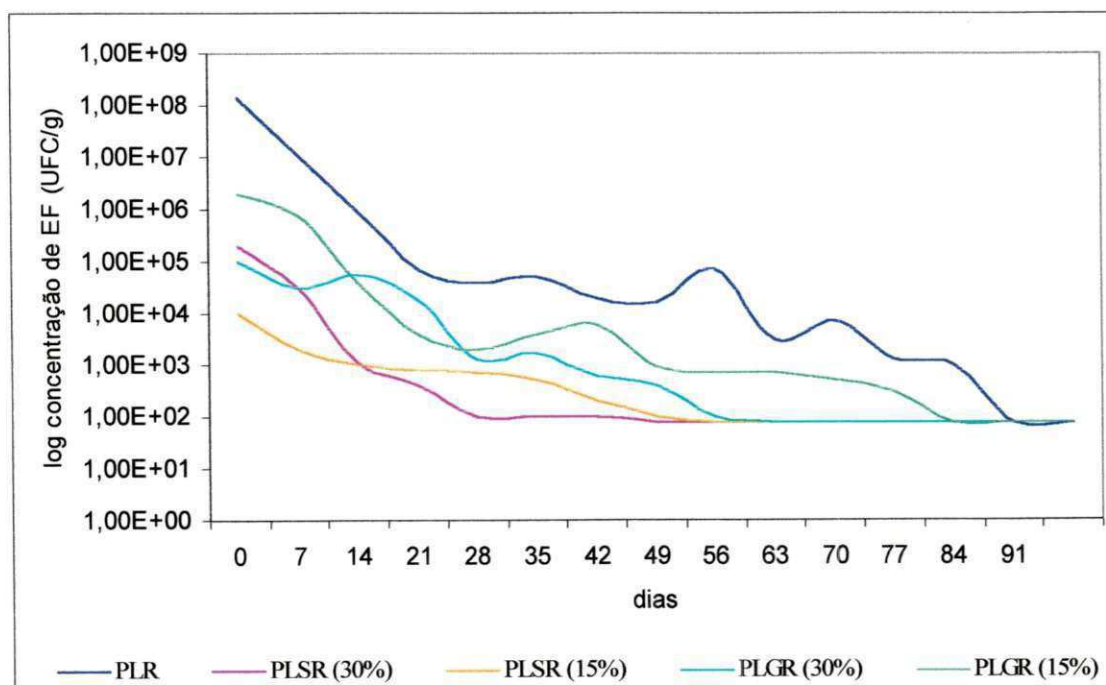


FIGURA 5.16: Concentração de Estreptococos fecais nas Pilhas de Compostagem

As pilhas que continham serragem na sua composição apresentaram uma maior eficiência quanto a sanitização, apresentando uma contagem de estreptococos fecais inferior a 100 UFC/grama no 49º dia na PLSR (30%) e no 56º dia na PLSR (15%).

Experimentos realizados por LELIS (1998), utilizando o mesmo processo de compostagem, apresentaram contagem de estreptococos fecais inferior a 100 UFC/grama após o 90º dia. Isto confirma o benefício obtido com a adição de serragem ao resíduo orgânico urbano na compostagem.

As demais pilhas apresentaram contagem de estreptococos fecais inferior a 100 UFC/grama após o 70º dia.

5.2.5 Observações Gerais

Ao longo do monitoramento foram observadas as alterações ocorridas nas pilhas de compostagem. O comportamento de cada experimento está apresentado nas FIGURAS 5.17 a 5.21.

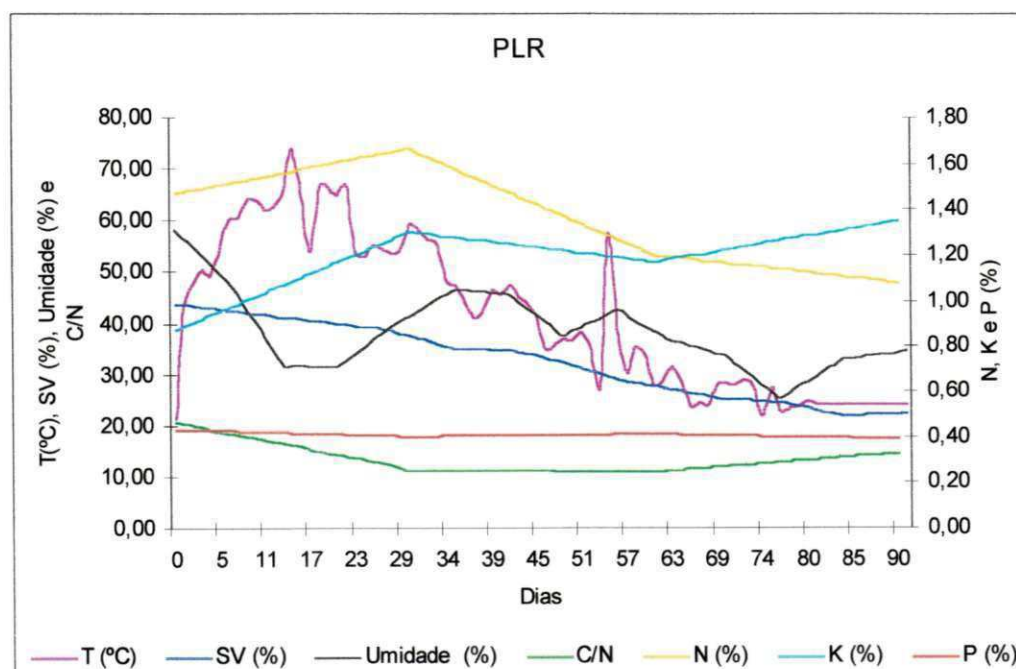


FIGURA 5.17: Comportamento dos parâmetros (temperatura, sólidos voláteis, umidade, relação C/N, nitrogênio, potássio e fósforo) monitorados na pilha composta por resíduo orgânico urbano – PLR – ao longo do processo.

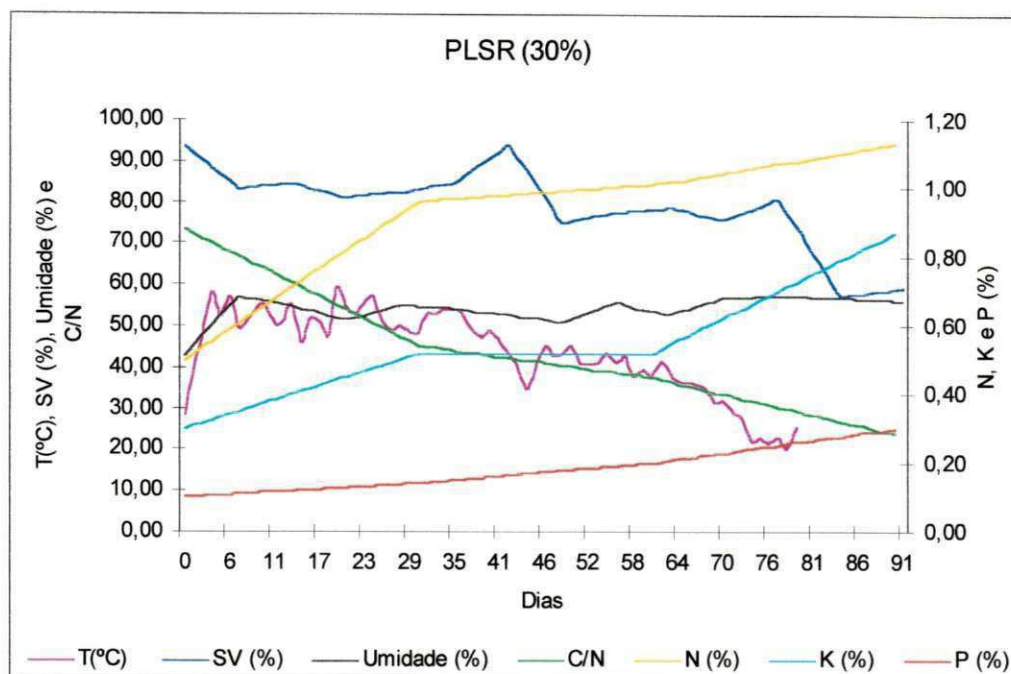


FIGURA 5.18: Comportamento dos parâmetros (temperatura, sólidos voláteis, umidade, relação C/N, nitrogênio, potássio e fósforo) monitorados na pilha composta por 30% em peso de serragem e 70% de resíduo orgânico urbano – PLSR (30%) – ao longo do processo.

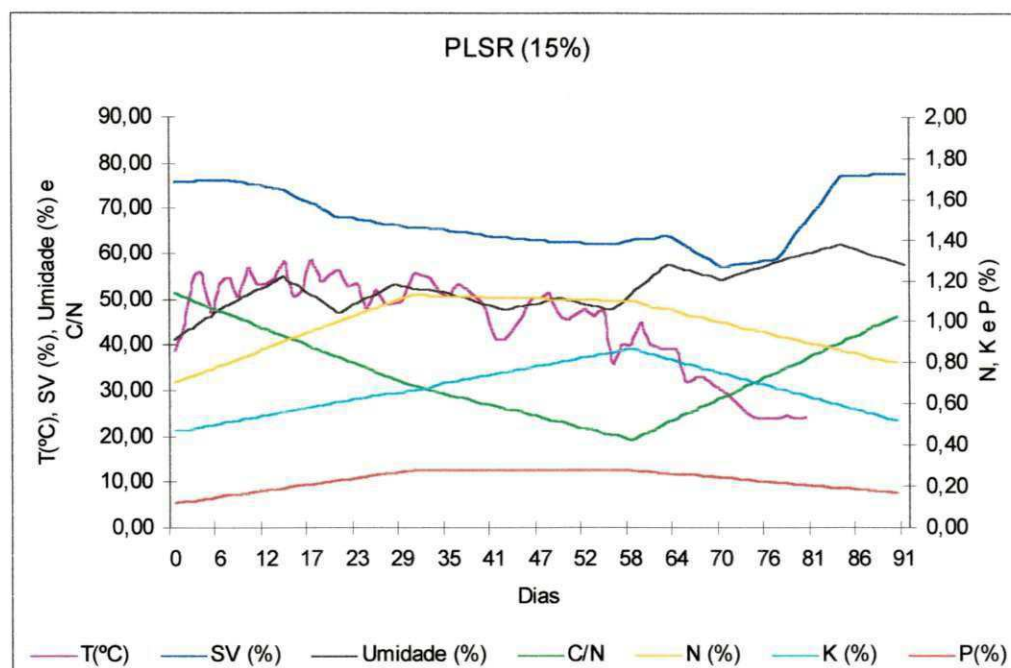


FIGURA 5.19: Comportamento dos parâmetros (temperatura, sólidos voláteis, umidade, relação C/N, nitrogênio, potássio e fósforo) monitorados na pilha composta por 15% em peso de serragem e 85% de resíduo orgânico urbano – PLSR (15%) – ao longo do processo.

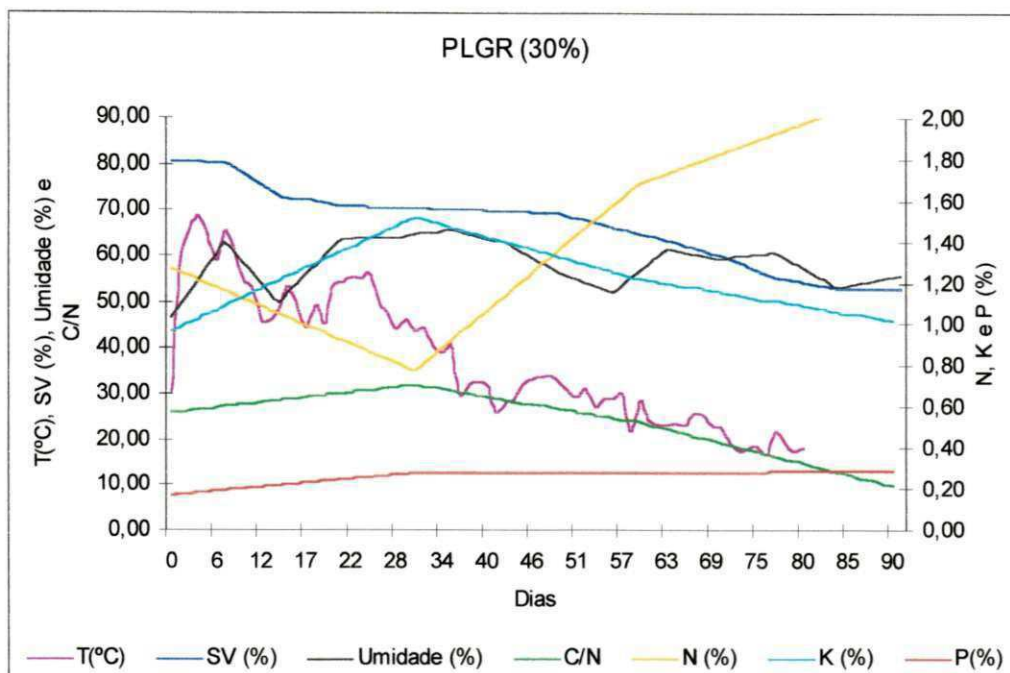


FIGURA 5.20: Comportamento dos parâmetros (temperatura, sólidos voláteis, umidade, relação C/N, nitrogênio, potássio e fósforo) monitorados na pilha composta por 30% em peso de grama e 70% de resíduo orgânico urbano – PLGR (30%) – ao longo do processo.

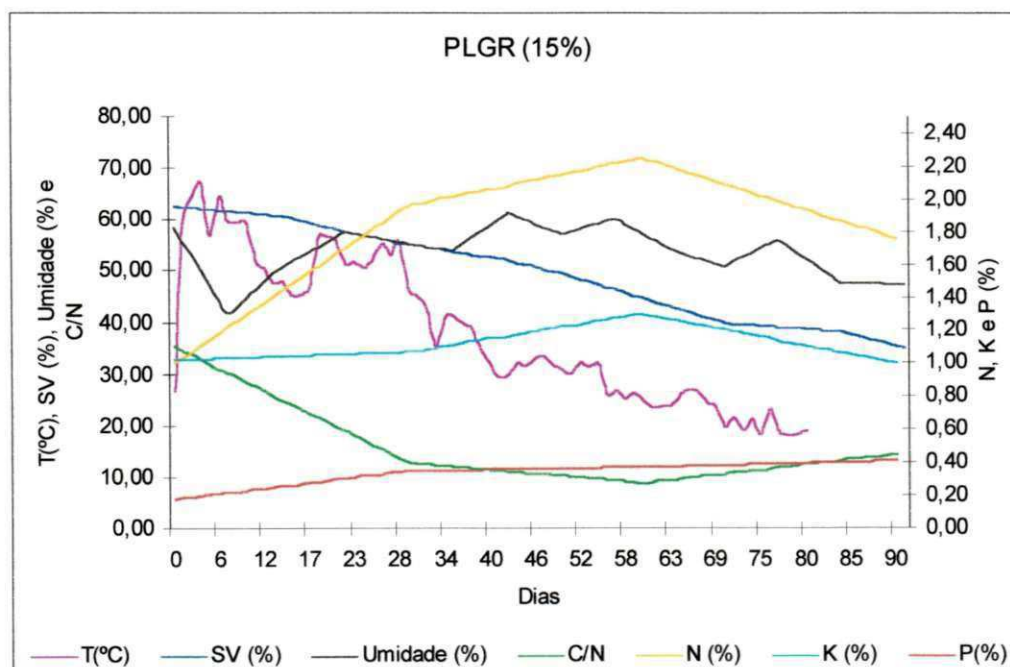


FIGURA 5.21: Comportamento dos parâmetros (temperatura, sólidos voláteis, umidade, relação C/N, nitrogênio, potássio e fósforo) monitorados na pilha composta por 15% em peso de grama e 85% de resíduo orgânico urbano – PLGR (15%) – ao longo do processo.

Foram observados também indícios de produção de chorume nas pilhas PLSR (30%), PLSR (15%) e PLRT nos primeiros dias do processo.

Não foi detectada emanção de odor característico de resíduo orgânico em decomposição nas pilhas que continham serragem e grama, mas sim um forte odor de material vegetal nas PLGR (30%) e PLGR (15%), e conseqüente atração de mosquitos nos primeiros dias do processo de compostagem.

O composto produzido apresentou coloração característica de material humificado em todos os experimentos (FIGURAS 5.22 a 5.25).



FIGURA 5.22 – Mudança das características da PLSR (30%). (a): pilha no dia 0. (b): pilha no dia 90, após peneiramento.

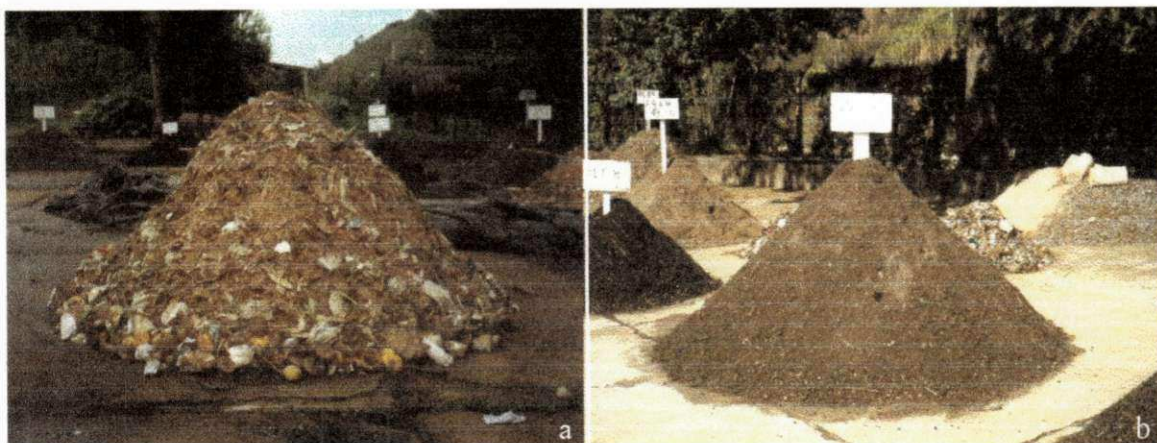


FIGURA 5.23 – Mudança das características da PLSR (15%) (a): pilha no dia 0. (b): pilha no dia 90, após peneiramento.



FIGURA 5.24 – Mudança das características da PLGR (30%). (a): pilha no dia 0. (b): pilha no dia 90, após peneiramento



FIGURA 5.25 – Mudança das características da PLGR (15%). (a): pilha no dia 0. (b): pilha no dia 90, após peneiramento.

6. CONCLUSÕES

Nos dois experimentos com serragem, pilha composta por 30% em peso de serragem e 70% de resíduo orgânico urbano – PLSR (30%) e pilha composta por 15% em peso de serragem e 85% de resíduo orgânico urbano – PLSR (15%), a fase de degradação ativa ocorreu dentro do período esperado (70 a 90 dias), não comprometendo o tempo de compostagem, apesar do material apresentar uma relação C/N alta (variando de 51 a 73) no início da compostagem.

Os resultados obtidos com a adição de grama nas proporções de 15 e 30% foram muito similares. Esta adição beneficiou o tempo de compostagem, o qual foi reduzindo de 70 para aproximadamente 40 dias, tendo um ganho de cerca de 30 dias. Sendo a adição de 15% benéfica também ao aumento da concentração de fósforo no composto (cerca de 23% de acréscimo).

As pilhas que continham grama tiveram rápido ressecamento da camada mais externa, sendo necessária a adição de água em excesso durante o reviramento, comprometendo assim a umidade ao longo do processo de compostagem. Porém, o material destas pilhas chegou ao final do processo com umidade em torno de 45%, a qual esta próxima a umidade máxima tolerada pela Legislação do Brasil (44%), segundo o IPT (2000).

O composto produzido a partir da mistura de serragem ao resíduo orgânico urbano apresentou umidade excessiva (em torno de 50%), sendo necessário a sua correção para a sua comercialização.

A utilização de serragens provenientes de diferentes tipos de madeiras usadas na marcenaria da UFV pode ter sido a causa das flutuações não esperadas e observadas nos teores de S. V. da massa de compostagem com serragem. Provavelmente uma melhor homogeneização desse material atenuaria esses valores discrepantes.

A adição de serragem mostrou ser eficiente na sanitização do composto, ao manter por mais tempo temperaturas termofílicas, garantindo um composto bacteriologicamente seguro.

As pilhas com grama atingiram uma relação C/N ótima, de acordo com os valores estabelecidos pela Legislação do Brasil (IPT, 2000).

O composto produzido com a mistura de serragem apresentou uma redução de 65% de C/N, que embora seja elevada, não atingiu o valor 20/1 estabelecido pela Legislação supracitada. A adição do material (serragem ou grama) foi desfavorável ao acréscimo de potássio.

Conclui-se que a adição de serragem bem como de materiais provenientes de capina e jardinagem ao resíduo orgânico urbano, em proporção de até 30% em peso, não prejudica a eficiência da compostagem, pelo contrário, é benéfica. Portanto, a compostagem pode ser uma solução eficiente para o tratamento destes resíduos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Resíduos Sólidos – Classificação*. 63 p. São Paulo: 1987.
- ALEXANDER, M. *Introduction to Soil Microbiology*. J. Wiley and Sons, New York: 1977
- APHA – AWWA – WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health 19^a Edition, Washinton D.C.: 1995.
- ARAGÃO, J. M. S.; STENTIFORD, E. I. *A Influência da Temperatura na Perda de Nitrogênio Durante a Compostagem*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 20. p. 152 – 153. Rio de Janeiro: 1999.
- BEFFA, T., BLANC, M., MARILLEY, L. et al. *Taxonomic and Metabolic Microbial Diversity During Composting*. In: DE BERTOLDI, M., SEQUI, P., LEMMES, B. (Ed.). *The Science of Composting*. Blackie Academic & Professional, p. 149-161, London: 1996.
- BLEY Jr, C. *Orgânicos do Lixo Urbano*. (http://www.ecoltec.com.br/biotec_lixourbano) 1998.
- BRADY, N. C. *Natureza e Propriedades dos Solos*. 7^a Edição. Freitas Bastos, Rio de Janeiro: 1989.
- BRITO, K. G. Q. *Estimativa dos Ganhos Sócio-Econômicos Obtidos com a Reciclagem de Lixo. Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo de Coimbra (MG) – Estudo do Caso*. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande: 2000.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARDENAS Jr., R. R., WANG, L. K. *Composting Process*. In: Handbook of Environmental Engineering. Clifton: Juman Press: 1980.
- DE BERTOLDI, M., VALLINI, G., PERA, A. *The biology of composting: a review*. In: Waste Management & Research. 1983.
- EGREJA FILHO, F. B. *Avaliação da Ocorrência e Distribuição Química de Metais Pesados na Compostagem do Lixo Domiciliar Urbano*. Dissertação de Mestrado, UFV – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal Viçosa, Viçosa: 1993.
- FINSTEIN, M. S. e MILLER, F. C. *Principles of Composting Leading to Maximization of Decomposition Rate, Odor Control, and Cost Effectiveness*. In: Seminar in Composting of Agricultural and Other Wastes. P 13 – 27. Oxfor, UK: 1984.
- GOLUEKE, C.G. *Biological Processing: Composting and Hydrolisis*. In: Solid Waste Management. Ed. Van Nostrand Reinholds, p.197 – 225, New York: 1977.
- GOLUEKE, C.G. *Principles of Biological Resource Recovery*. In: Biocycle, p.36 – 40, 1981.
- GOLUEKE, C.G. *Principles of Composting*. In: Biocycle Guide to the Art & Science for Composting .J.G. Press., p.14 – 37, Emmaus, Pennsylvania: 1991.
- GOUIN, R. F. & SKANKS B.J. *Composting Suitability for Green House Ornamental Plants*. In: Biocycle., p.42 – 45, 1984.
- GOUVÊA, L. C. *Estudo da Compostabilidade do Lodo de Esgoto e Avaliação da Distribuição Química de Metais Pesados no Decorrer do Processo*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa:1995.

- GOUVEIA, L. C.; PEREIRA NETO, J. T. *Análises de Amostras de Compostos Orgânicos de Origem Urbana e Agrícola sob Diferentes Estágios de Degradação*. In: Seminário Nacional Sobre Resíduos Sólidos – Gestão Integrada, 4. p. 329 – 332. Anais. Recife: 2000
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA
(www.ibge.gov.br)
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS/CEMPRE – Compromisso Empresarial para a Reciclagem. *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. São Paulo: 2000.
- JAHNEL, M. C, MELLONI, R., CARDOSO, E. J. B. N. *Scientia Agrícola* v.56 n.2 Piracicaba:1999.
- KENNER, B.A, CLARK, H. F., KLABER, P.V. *Faecal Streptococci in Surface Water*. Adv. Applied Microbyal: 1961.
- KIEHL, E.J. *Fertilizantes Orgânicos*. Piracicaba: 1985.
- KIEHL, E.J. *Manual de Compostagem – Maturação e Qualidade do Composto*. Piracicaba: 1998.
- LEITE, V.D, DE SOUSA, J. T., LOPES, W. S. *Processo de Tratamento Anaeróbio de Resíduo Sólido Urbano*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21. João Pessoa: 2001.
- LEITE, V.D. *Origem e Composição dos Resíduos Sólidos*. Trabalho apresentado à comissão julgadora do concurso público de provas e títulos para o preenchimento de vagas para o cargo de Professor Titular do quadro do magistério superior da UEPB. UEPB – Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande:1998.

- LELIS, M.P.N. *Influência da Umidade na Velocidade de Degradação e no Controle de Impactos Ambientais da Compostagem*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1998. 160p. (Dissertação, Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, 1998.
- LIMA, L. M. Q. *Tratamento de Lixo*. Hemus Editora Limitada 2º Edição Revista, São Paulo: 1991.
- LIMA, M. *Um Bebê = 25 Toneladas de Lixo*. Revista Veja: 17 de março de 1999.
- MILLER, F. C. *Composting of Municipal Solid Waste and its Components*. In: PALMISANO & BARLAZ. *Microbiology of Solid Waste*. New York: 1996.
- PELCZAR, M., REID, R., CHAN, E. C. S. *Microbiologia*. Volume I. McGraw-Hill, São Paulo: 1980.
- PEREIRA NETO, J. T.; STENTIFOR, E. I.; MARA, D. D. *Sistema de Compostagem por Pilhas Estáticas Aeradas – Uma Alternativa de Baixo Custo ao Tratamento e Reciclagem do Lixo Urbano e Lamas de Esgoto Domésticos*. P. 3 – 19. (Publicações APESB, 29) Lisboa,: 1985.
- PEREIRA NETO, J.T. *On the treatment of municipal refuse and sewage sludge using aerated static pile composting; a low cost technology approach*. Tese de Doutorado – University of Leeds, Leeds:1987.
- PEREIRA NETO, J. T. *Monitoramento da Eliminação de Organismos Patogênicos Durante a Compostagem do Lixo Urbano e do Lodo de Esgotos pelo Sistema de Pilhas Estáticas Aeradas*. Engenharia Sanitária, (2), 148 – 152 1988.
- PEREIRA NETO, J. T. *Conceitos Modernos de Compostagem*. Engenharia Sanitária, abril/jun 104-109, 1989.

- PEREIRA NETO, J. T. *Tratamento, Reciclagem e Impacto Ambiental de Dejetos Agrícolas*. In: Agricultura E Meio Ambiente, P. 61 – 74 . Anais. Viçosa: 1992.
- PEREIRA NETO, J. T. *Manual de Compostagem*. UFV/SLU/UNICEF, Belo Horizonte: 1996.
- PEREIRA NETO, J. T. *Quanto Vale Nosso Lixo*. Projeto Verde Vale, Belo Horizonte: 1999.
- PEREIRA NETO, J. T.; LELIS, M. P. N. *Reciclagem dos Resíduos Orgânicos: Avaliação do Potencial de Reintegração Ambiental e Econômica nos Municípios de Pequeno Porte do Estado de Minas Gerais*. In: Seminário Nacional Sobre Resíduos Sólidos – Gestão Integrada, 4. p. 279 – 284. Anais. Recife: 2000.
- RIBEIRO FILHO, J. N, DE LUCENA, K. F. M, *A Problemática dos Resíduos Sólidos Domiciliares da Cidade de Cajazeiras – PB. .* In: Seminário Nacional Sobre Resíduos Sólidos – Gestão Integrada, 4. p. 114 – 118. Anais. Recife: 2000
- RUSSO, M. A. T. *Avaliação de Parâmetros que Influenciam a Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos e Sua Importância na Qualidade do Composto: Aplicação a Casos de Estudo*. Dissertação de Mestrado – Instituto Politécnico de Viana do Castelo – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Viana do Castelo: 1988.
- DA SILVEIRA, A. I. E. *Contribuição para o Estudo da Influência da Relação Carbono/Azoto no Processo de Compostagem de Resíduos Sólidos*. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa: 1987.
- SAWYER, C. N.; McCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. *Chemistry for Environmental Engineering*. Fourth Edition. McGraw-Hill, Inc. New York: 1994.
- SIQUEIRA, J. O. *Biotechnology do Solo. Fundamentos e Perspectivas*. Brasília, MEC, ABEAS/Lavras, ESAL, FAEDE: 1988.

- STENTIFORD, E. I. *Composting of Sewage Sludge and Solid Wastes*. University of Leeds. Leeds: 1991.
- SWIFT, R. S. *Organic Matter Characterization (Chap. 35)*. In: D. L. Sparks et al. (eds) *Methods of Soil Analysis. Part 3. chemical Methods*. Soil Sci. Soc. Am. Book Series 5. Madison, WI: 1996.
- VILLELA, G. G. *Bioquímica dos Microrganismos*. Universidade Federal de Pernambuco, Recife: 1972.
- VILLANI, F. T. *Estudo e avaliação de Métodos Químicos para Determinar o Grau de Maturação dos Compostos Orgânicos do Lixo Urbano Domiciliar*. Dissertação de Mestrado em Agroquímica da UFV – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG: 1993.
- WAKSMAN, S. A. *Húmus: Origin, Chemical Composition and Importance in Nature*. Wilians & Wilkins, Baltimore:1983.
- WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION – WPCF. *Sludge Stabilization: Manual of Pratic Facilities Development*. [S.I.. s.n.]; 1985. (Mimeogr.).
- WHITE, P. R., FRANKE, M. AND HINDLE, P. *Intergrated Solid Waste Management – A Lifecycle Inventory*. Blacie Academic & Professional, London:1995.