

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

BÁRBARA SILVA PEREIRA

SISTEMAS EXPERIMENTAIS DE COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS
ORGÂNICOS: ESTUDOS DE CASO

BAURU/SP
2016

BÁRBARA SILVA PEREIRA

SISTEMAS EXPERIMENTAIS DE COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS
ORGÂNICOS: ESTUDOS DE CASO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia da UNESP, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão de Operações e Sistemas.

Orientadora: Profa. Dra. Rosane Aparecida Gomes Battistelle

Co-orientadora: Profa. Dra. Ilza Machado Kaiser

BAURU/SP
2016

Pereira, Bárbara Silva.

Sistemas experimentais de compostagem de resíduos orgânicos : estudos de caso / Bárbara Silva Pereira, 2016

115 f.

Orientador: Rosane Aparecida Gomes Battistelle

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2016

1. Resíduos sólidos. 2. Compostagem industrial. 3. Compostagem doméstica. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE BÁRBARA SILVA PEREIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DA FACULDADE DE ENGENHARIA.

Aos 24 dias do mês de junho do ano de 2016, às 10:00 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática/FE, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. ROSANE APARECIDA G BATTISTELLE - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ALOISIO COSTA SAMPAIO do(a) Departamento de Ciências Biológicas / Faculdade de Ciências, Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de BÁRBARA SILVA PEREIRA, intitulada **ESTUDO COMPARATIVO DO PROCESSO DE CO-COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS POR MEIO DE SISTEMAS EXPERIMENTAIS DE COMPOSTAGEM INDUSTRIAL E DOMÉSTICA**. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Profa. Dra. ROSANE APARECIDA G BATTISTELLE


Prof. Dr. ALOISIO COSTA SAMPAIO


Prof. Dr. IVALDO DE DOMENICO VALARELLI



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Bauru

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA:
BÁRBARA SILVA PEREIRA

DE: "ESTUDO COMPARATIVO DO PROCESSO DE CO-COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS POR MEIO DE
SISTEMAS EXPERIMENTAIS DE COMPOSTAGEM INDUSTRIAL E DOMÉSTICA"

PARA:

*Sistemas Experimentais de Compostagem de
resíduos Orgânicos: Estudo de Caso.*

Bauru, 24 de junho 2016.


Prof.ª Dr.ª Rosane Aparecida Gomes Battistelle

Orientadora



Faculdade de Engenharia de Bauru – Pós-graduação
Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01 17033-360 Bauru - SP
tel. (14) 3103-6108 spg@feb.unesp.br www.feb.unesp.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, a Deus pelo dom da vida, e por estar comigo em todos os momentos, sendo sempre a minha base e sustento ao longo desse novo caminho.

Quero agradecer à Prof^a Dr^a Rosane Aparecida Gomes Battistelle, por estar sempre presente em minha vida, pelo incentivo e dedicação, e por me dar a oportunidade de desenvolver este mestrado.

À minha co-orientadora, Prof^a Dr^a Ilza Machado Kaiser, pelo enorme auxílio nesta pesquisa.

Ao meu parceiro de trabalho Ms. Edvaldo José Scoton.

Agradeço também, aos funcionários do Laboratório de Saneamento do Departamento de Água e Esgotos de Bauru em parceria com a FEB/UNESP, e principalmente, ao Dr. Glauco Perpétuo, pelas análises laboratoriais realizadas, além de toda a atenção e grande colaboração nesta pesquisa.

Aos Laboratórios de Saneamento e de Química Ambiental da USP São Carlos, e aos técnicos Júlio Cesar Trofino e Maria Diva Landgraf, pela colaboração nas análises laboratoriais.

Ao Prof. Dr. Ivaldo De Domenico Valarelli, responsável pelo Laboratório de Processamento da Madeira, do Departamento de Engenharia Mecânica, e aos técnicos Marcus Bueno (Torrinha) e Luiz Eduardo, pelo auxílio e dedicação, essenciais para esta pesquisa.

Muito obrigada a todos os professores e funcionários do Curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção e do Departamento de Engenharia Civil.

À minha família, em especial à minha mãe, que foi parte ativa neste trabalho, auxiliando em todas as horas com amor e paciência.

RESUMO

Cada vez mais a busca de soluções ambientalmente corretas para a destinação dos resíduos sólidos tem se tornado urgente, impulsionada pelo rápido crescimento populacional e pelo desenvolvimento econômico. A compostagem é uma ferramenta tradicional e sustentável de grande importância para o tratamento da parte orgânica dos resíduos sólidos, realizando o processamento dos resíduos orgânicos originados da agroindústria, da agricultura, do comércio e dos domicílios, como os restos de alimentos. Este trabalho aborda o tratamento de resíduos de alimentos provenientes de restaurantes, por meio de uma pesquisa aplicada experimental com três modelos de processamento (dois industriais e um doméstico). Um processo de co-compostagem, com adição de outros resíduos estruturantes, foi desenvolvido e comparado com os principais modelos de compostagem. Este estudo objetiva avaliar as técnicas para otimizar os processos de compostagem, por meio da avaliação de parâmetros de degradação biológica dos resíduos sólidos (pH, umidade, temperatura, teor de oxigênio, relação carbono/nitrogênio e qualidade do composto produzido), contribuindo para a escolha do melhor método para a destinação adequada dos resíduos orgânicos. Em relação aos resultados obtidos e às análises químicas, pode-se mencionar que o sistema de reator biológico foi o método que estabilizou mais rapidamente os resíduos. Quanto à qualidade do composto, nenhum dos sistemas de compostagem obteve um composto de boa qualidade para o seu uso na agricultura. Algumas falhas foram observadas nos métodos, interferindo no desenvolvimento do processo. No entanto, apresentaram valores de teor de umidade, pH e DBO dentro da faixa ideal para compostagem, o que demonstra que houve evolução dos processos.

Palavras-chave: Resíduos sólidos; Compostagem industrial; Compostagem doméstica; Resíduos de alimentos.

ABSTRACT

The need to search for environmentally friendly solutions for solid waste disposal has become urgent, driven by rapid population growth and economic development. Composting is a traditional and sustainable tool of great importance for the treatment of the organic fraction of solid waste; processing organic waste originated from agricultural industry, agriculture, commerce and households, such as food scraps. This work deals with the treatment of food waste from restaurants, through an applied experimental research with three composting processing models (two industrial and one domestic). A co-composting with the addition of other structural waste, was developed and compared to the studied composting models. This study aims to obtain ways to accelerate and optimize the composting process, through the evaluation of biological degradation of solid waste parameters (pH, humidity, temperature, oxygen content, carbon / nitrogen ratio and quality of compost produced), contributing to the choice of the best method for proper disposal of organic waste. Regarding the results obtained and the chemical analysis, it can be mentioned that the bioreactor system is the method that quickly stabilized waste. As the quality of the compost, composting none of the systems obtained a good quality compost for use in agriculture. Some failures were observed in the methods, interfering with the development of the process. However, they exhibited moisture content, pH and DBO within the ideal range for composting, which demonstrates that there was development of processes.

Keywords: Solid waste; Industrial composting; Domestic composting; Food waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Composição física dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	24
Figura 2. Estimativa da quantidade de resíduos sólidos gerados no Brasil.	26
Figura 3. Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos.	28
Figura 4. Representação das entradas e saídas do processo de compostagem.....	34
Figura 5. Variação do pH ao longo do processo de compostagem..	42
Figura 6. Sistemas de leiras revolvidas, por máquina (esq.) e manual (direita)..	48
Figura 7. Sistemas de leiras estáticas aeradas.	49
Figura 8. Compostagem através de sistemas fechados ou reatores biológicos.....	51
Figura 9. Esquema da instalação piloto de laboratório para compostagem	52
Figura 10. Estrutura geral do processo de análise de compostagem	52
Figura 11. Tambor rotativo no interior da caixa termorreguladora	53
Figura 12. Tambor rotativo e equipamentos acoplados	54
Figura 13. Analisador de gases modelo S710.....	55
Figura 14. Display do analisador de gases modelo S710	55
Figura 15. Aquisição de dados pelo computador	55
Figura 16. Tela principal do software.	56
Figura 17. Sequência de dados do analisador de gases	56
Figura 18. Exemplos de composteiras domésticas.	58
Figura 19. Resíduos de alimentos.....	62
Figura 20. Farelo de bagaço de cana-de-açúcar.....	62
Figura 21. Borra de pó de café.....	62
Figura 22. Resíduos de poda de grama triturados.....	62
Figura 23. Serragem.....	63
Figura 24. Área de jardim de escola de ensino fundamental.....	64
Figura 25. Leira 1 (esquerda) e leira 2 (direita).....	64
Figura 26. Composteiras domésticas de caixas de três andares.....	65
Figura 27. Minhocas Californianas ou Vermelhas (Eisenia foetida).....	66
Figura 28. Triturador dos resíduos de poda de grama.....	68
Figura 29. Termômetro Digital Tipo Espeto.....	69
Figura 30. Filtragem das amostras.....	71
Figura 31. Amostras filtradas.....	71

Figura 32. Aparelho medidor de pH.....	71
Figura 33. Frascos utilizados durante as análises de pH e DBO.	72
Figura 34. Aparelho medidor de DBO (Estufa com Fotoperíodo e Termoperíodo).....	73
Figura 35. Revolvimento manual das leiras com auxílio de rastelo.....	73
Figura 36. Compostos produzidos em cada um dos sistemas.....	78
Figura 37. Resultado físico dos sistemas de leiras.....	79
Figura38. Gráfico da evolução das temperaturas nas leiras de compostagem.....	81
Figura 39. Resultado físico da caixa 2 da composteira 1 (verde).....	85
Figura 40. Resultado físico da caixa 2 da composteira 2 (azul)	86
Figura 41. Gráfico da evolução das temperaturas nas composteiras.....	88
Figura 42. Gráfico da evolução das temperaturas nas composteiras.....	89
Figura 43. Composto no início e ao final do processo.....	93
Figura 44. Tempo gasto para consumo de O ₂	94
Figura 45. Consumo de oxigênio expresso em massa (g)	96
Figura 46. Produção de gás carbônico expresso em massa (g)	97
Figura 47. Gráfico das temperaturas dos sistemas de compostagem.....	101
Figura 48. Gráfico dos valores de umidade dos sistemas de compostagem.....	103
Figura 49. Gráfico dos valores de DBO dos sistemas de compostagem.....	104
Figura 50. Distribuição da DBO durante o processo de compostagem.....	105
Figura 51. Gráfico dos valores de pH dos sistemas de compostagem.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fontes dos resíduos sólidos.....	23
Tabela 2. Estimativa da composição dos resíduos sólidos urbanos no Brasil..	25
Tabela 3. Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos.	25
Tabela 4. Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos	27
Tabela 5. Resíduos orgânicos do restaurante da Unesp, expressos em (kg)	32
Tabela 6. Composição de alguns materiais empregados no preparo do composto..	39
Tabela 7. Diferenças entre composto estabilizado e composto não estabilizado	45
Tabela 8. Classificações dos processos de compostagem.....	45
Tabela 9. Composição dos resíduos utilizados no processo de compostagem.....	75
Tabela 10. Composição dos resíduos utilizados na compostagem.....	75
Tabela 11. Composição dos produtos finais do processo	77
Tabela 12. Composição dos produtos finais do processo de compostagem.....	77
Tabela 13. Evolução das temperaturas ao longo do processo de compostagem.....	81
Tabela 14. Evolução das temperaturas ao longo do processo	82
Tabela 15. Valores de teor de umidade da massa de resíduos	83
Tabela 16. Valores de DBO ao longo do processo de compostagem.....	83
Tabela 17. Valores de pH ao longo do processo de compostagem.....	84
Tabela 18. Evolução das temperaturas ao longo do processo	87
Tabela 19. Evolução das temperaturas ao longo do processo	89
Tabela 20. Valores de teor de umidade da massa de resíduos.....	91
Tabela 21. Valores de DBO ao longo do processo de compostagem.....	91
Tabela 22. Valores de pH ao longo do processo de compostagem.....	92
Tabela 23. Tempo gasto para consumo do oxigênio.....	93
Tabela 24. Massa e volume de oxigênio consumido e gás carbônico produzido.....	95
Tabela 25. Valores referentes a produção de CO ₂ e consumo de O ₂	98
Tabela 26. Umidade.....	99
Tabela 27. Temperatura dos sistemas em função do tempo	101
Tabela 28. Umidade das amostras em função do tempo de compostagem.....	102
Tabela 29. Valores de DBO dos sistemas.....	104
Tabela 30. Valores de pH dos sistemas de compostagem.....	105

LISTA DE NOMENCLATURA

AVC	Avaliação do Ciclo de Vida
Ca	Cálcio
C/N	Relação Carbono e Nitrogênio
Cu	Cobre
DAE	Departamento de Água e Esgoto de Bauru
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
Fe	Ferro
IRD	Índice de Respiração Dinâmica
IRE	Índice de Respiração Estática
LISA	Laboratório di Ingegneria Sanitaria-Ambientale
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
M.O.T	Matéria Orgânica
Na	Sódio
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
ONG	Organização Não Governamental
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de Vinila
QR	Quociente Respiratório
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
TCO ₂	Taxa de Consumo de Oxigênio
UNESP	Universidade Estadual Paulista
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Problema da pesquisa	14
1.2 Objetivo	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 Justificativa	16
1.4 Estrutura do trabalho	18
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	19
2.1 Resíduos sólidos	19
2.1.1 Definição e classificação	20
2.1.2 Composição e destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	24
2.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)	30
2.3 Resíduos de alimentos	31
2.4 Compostagem	33
2.4.1 Parâmetros físico-químicos que interferem no processo	35
2.4.1.1 Aeração	35
2.4.1.2 Temperatura	36
2.4.1.3 Umidade	37
2.4.1.4 Relação C/N	38
2.4.1.5 Granulometria do material	41
2.4.2 Características do composto orgânico	43
2.4.3 Diferentes processos de compostagem	45
2.4.3.1 Sistemas de leiras	47
2.4.3.2 Sistemas de reatores biológicos	49
2.4.3.3 Sistemas de compostagem doméstica	57
2.4.4 Aplicações do método respirométrico	59
3 MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1 Resíduos utilizados	61
3.2 Método em leira	63
3.3 Método em composteira doméstica	64

3.4 Coleta de dados.....	66
3.5 Forma de análise dos dados.....	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
4.1 Compostos.....	76
4.2 Sistemas de leiras.....	78
4.3 Sistemas de composteiras domésticas.....	84
4.4 Sistema de reator.....	92
4.5 Comparação dos sistemas.....	99
4.5.1 Tempo de processo.....	99
4.5.2 Temperatura.....	100
4.5.3 Umidade.....	102
4.5.4 DBO.....	103
4.5.5 pH.....	105
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
6 CONCLUSÃO.....	109
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	110

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios que o mundo encontra atualmente na busca por um ambiente sustentável é a destinação correta dos resíduos sólidos gerados pelas atividades humanas. O direcionamento dos resíduos tem sido feito, em geral, em aterros sanitários e /ou “lixões”, resultando em um material com alto poder poluidor, atrativo de animais e doenças, e emissor de gases poluentes (INSTITUTO DE PESQUISA ECONOMICA APLICADA, 2012; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012).

A falta de espaço físico para a disposição final adequada dos resíduos fez com que a reciclagem deixasse de ser apenas um conceito para tornar-se uma prática, tornando-se uma opção para o reaproveitamento de resíduos. Eriksson *et al.* (2005) comentam que a diminuição da deposição em aterros em favor do aumento da reciclagem de materiais (vidro, papel, plástico, metais e resíduos orgânicos) geram um menor impacto ambiental e menor demanda de energia.

O problema da falta de locais adequados para o descarte dos resíduos humanos e técnicas cada vez mais caras para o seu tratamento, tem levado muitos municípios a colocar em prática uma política para seu gerenciamento integrado, tendo como medidas, a redução na fonte, a reutilização, a reciclagem, a compostagem e a disposição em aterros, de forma unificada (SILVA *et al.*, 2009).

Entretanto, o emprego do processo de compostagem no Brasil ainda é bastante restrito, quando comparado ao método do aterro sanitário. Devido principalmente ao fato de exigir maior investimento inicial, oferecer maior dificuldade operacional e custo unitário de tratamento superior ao referido método. Somam-se ainda a esses fatos, as experiências negativas ocorridas com usinas de compostagem implementadas no passado, por falta de conhecimento técnico mais aprofundado (AKUTSU *et al.*, 2009). No entanto, devido à vantagem ambiental associada ao método, pesquisas relacionadas a esse tema tem se intensificado nos últimos anos (SILVA *et al.*, 2009).

A utilização do processo de compostagem mostra-se de extrema importância em uma sociedade que busca uma sustentabilidade social, econômica e principalmente ambiental. O composto resultante apresenta benefícios, como, a redução do uso de fertilizantes químicos; a diminuição significativa da quantidade de resíduos a depositar em aterros; o fornecimento de um material rico em nutrientes

que melhora o crescimento de plantas e jardins; a redução do potencial poluidor da agricultura intensiva, entre outros (BERNAL *et al.*, 2009; KIEHL, 2004; MARTÍNEZ-BLANCO *et al.*, 2010).

Os resíduos orgânicos, que são a matéria prima para a compostagem, no Brasil, correspondem a um percentual acima da metade de todo o montante de resíduos coletados no país. Em escala global, aproximadamente 26 milhões de toneladas de alimentos são jogados no lixo anualmente, conforme citações de Nakashima *et al.* (2009), quantidade essa que justifica o desenvolvimento de pesquisas para melhor empregar os resíduos úmidos.

1.1 Problema da pesquisa

A gestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos é um problema crescente, devido ao rápido colapso dos aterros sanitários, à falta de espaços adequados para o descarte de resíduos, à contaminação ambiental e perda de recursos naturais que ocasiona (COLÓN *et al.*, 2010).

Na busca por soluções para a destinação correta dos resíduos sólidos orgânicos, destaca-se o processo de compostagem, por ser considerada uma das alternativas mais adequadas sob o ponto de vista ambiental para gerenciar e tratar resíduos sólidos orgânicos (SHEN *et al.*, 2012). Uma vez que essa destinação proporciona a ciclagem dos nutrientes, permitindo que a fração orgânica do lixo possa ser reutilizada, diminuindo assim, a contaminação ambiental.

Segundo Guardia *et al.* (2012), apesar das pesquisas já desenvolvidas, um melhor entendimento e aperfeiçoamento do processo de compostagem se faz necessário e as investigações devem prosseguir, especialmente sobre os tempos de estabilização do composto, da tecnologia a ser utilizada e os tipos de resíduos a serem utilizados. Devido também, à imprecisão e dúvidas sobre o processo, e à sua complexidade, uma vez que exige a consideração de diversas variáveis e condições em que o processo será conduzido, como temperatura, umidade e quantidade de oxigênio, por exemplo. Além do alto grau de empirismo associado ao emprego desse método.

Também faltam pesquisas comparando experimentalmente, com montagem de pilotos, os três grupos de sistemas de compostagem (leiras, reatores e

composteiras domésticas) operados simultaneamente, com o mesmo tipo de resíduo.

Diante deste cenário, surge a seguinte questão: Utilizando-se de estudo comparativo do processo de co-compostagem de resíduos, relacionar os dados obtidos das variáveis (composição dos resíduos; umidade; teor de oxigênio; temperatura; relação C/N; tamanho de partícula e pH), nos experimentos de compostagem por meio de leira, composteira doméstica e reator hermético rotacional, é possível obter parâmetros de degradação da matéria orgânica que garantam a aceleração e a otimização do processo de compostagem?

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

Caracterizar, por meio de experimentos, três modelos diferentes de processo de compostagem, dois tidos como industriais (compostagem em reator e em leira) e um artesanal (compostagem doméstica), buscando uma melhor forma de destinação dos resíduos sólidos orgânicos, quanto aos parâmetros: composição dos resíduos, umidade, teor de oxigênio, temperatura, relação carbono/nitrogênio (C/N), tamanho de partícula, pH, e, principalmente a qualidade do composto produzido. Este último em relação à sua composição (umidade, nutrientes, etc.), de acordo com a legislação do mercado da agricultura, levando-se em consideração também o tempo para a estabilização do composto.

1.2.2 Objetivos específicos

Realizar a construção de pilotos, dos métodos de co-compostagem em reator, em leira de compostagem e composteira doméstica, utilizando os mesmos resíduos orgânicos. E assim, obter parâmetros para aceleração e otimização do processo de compostagem.

Verificar se o método respirométrico, utilizado no piloto de compostagem em reator, é, de fato, uma alternativa útil e confiável em relação às respostas fornecidas

pelo mesmo no acompanhamento operacional e avaliativo do processo de degradação dos resíduos.

1.3 Justificativa

Os três métodos foram estudados a fim de subsidiar o aprimoramento dos métodos e técnicas de tratamento e disposição final dos resíduos gerados pelas atividades humanas, proporcionando melhoria da qualidade do meio ambiente e a minimização dos efeitos nocivos que os processos de produção podem causar à natureza. Uma vez que é primordial o desenvolvimento de pesquisas e comparação de métodos e padrões de produção, consumo e reprodução mais sustentáveis ou ambientalmente adequados.

Estudos bibliométricos constataram um crescimento de pesquisas no tema “resíduos sólidos” expressivamente nos últimos cinco anos (FU *et al.*, 2010; YANG *et al.*, 2012), e na disposição adequada dos resíduos sólidos como tema principal, observado internacionalmente (FU *et al.*, 2010), sendo esse, também evidenciado nos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

Uma pesquisa realizada por Barrena *et al.* (2014), comparou a compostagem industrial com a compostagem doméstica a partir da análise em amostras do composto produzido em composteiras domésticas e, em instalações industriais de compostagem que utilizaram-se de reatores e leiras. Para os autores, a compostagem é considerada uma alternativa mais sustentável em relação ao aterro sanitário e a incineração na gestão de resíduos de alimentos.

Os pesquisadores Martínez-Blanco *et al.* (2010), comparam os processos doméstico e industrial a partir de seus impactos ambientais, utilizando a ferramenta ambiental com base na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), sendo os dados da compostagem doméstica obtidos de forma experimental com a construção de uma composteira, e os dados da compostagem industrial obtidos em uma unidade industrial de compostagem. Porém, faltam pesquisas comparando experimentalmente, com montagem de pilotos, os três métodos operados simultaneamente, com o mesmo tipo de resíduo.

As pesquisas que tratam do processo de compostagem tem sido focadas no desenvolvimento em escala industrial a partir de perspectivas técnicas e ambientais

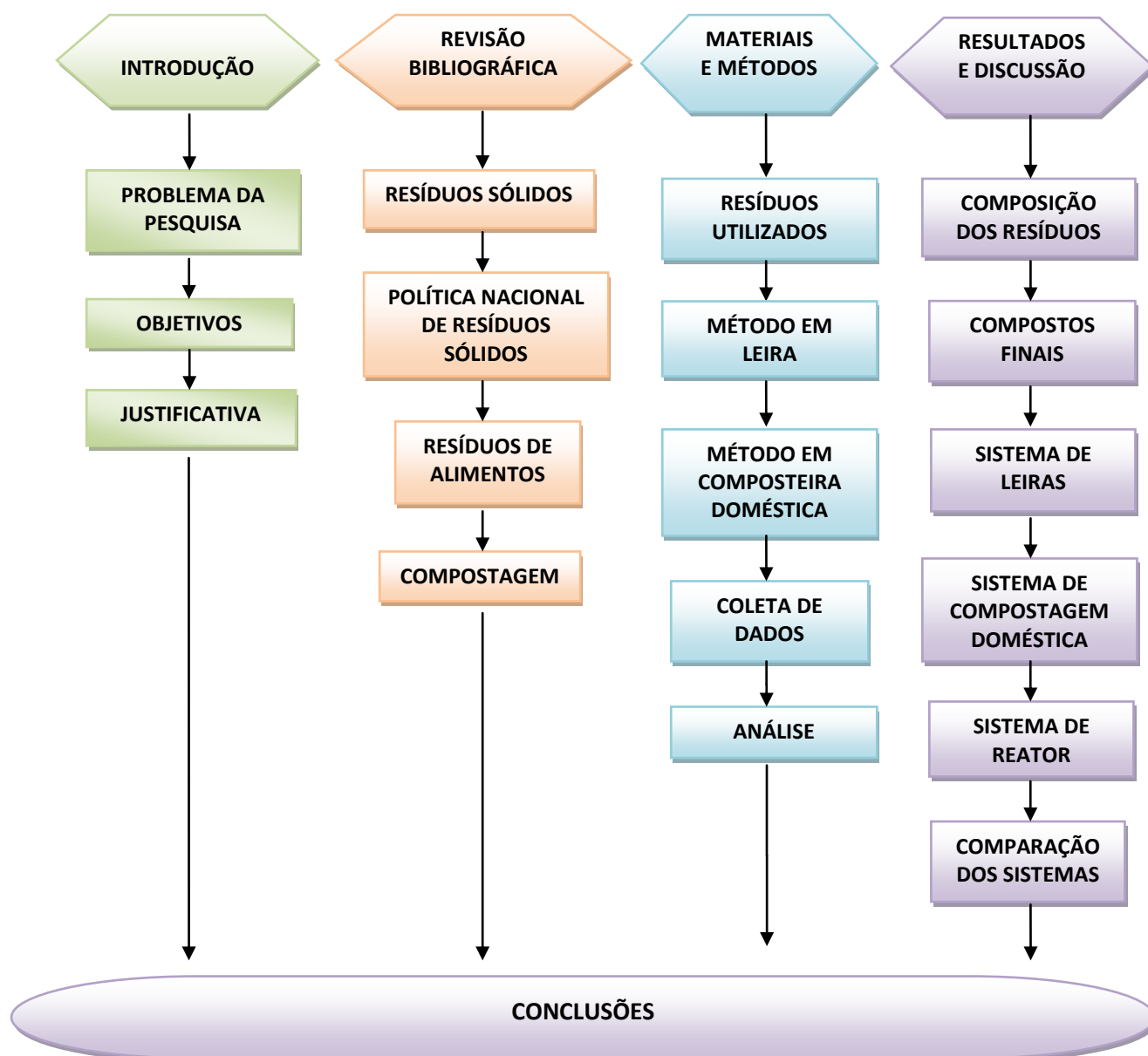
(AMLINGER *et al.*, 2008; BLENGINI, 2008 ; COLÓN *et al.*, 2010 ; RUGGIERI *et al.*, 2008), mas este é um processo que também pode ser desenvolvido em pequena escala, com compostagens domésticas caseiras, através de processos ainda não estudados extensivamente a partir de uma perspectiva técnica e científica (AMLINGER *et al.*, 2008; ANDERSEN *et al.*, 2012; CHANAKYA *et al.*, 2007 ; COLÓN *et al.*, 2010).

Sendo assim, existe uma necessidade proeminente no desenvolvimento de pesquisas científicas, no intuito de aperfeiçoar esta prática, e buscar soluções adequadas do manejo e descarte dos resíduos sólidos, por meio de inovações tecnológicas que reparem e previnam novos problemas.

Desta forma, esta pesquisa busca preencher e esclarecer questões relacionadas ao desempenho do processo de compostagem realizado em três tecnologias diferentes, ou seja, o processo de compostagem industrial (em reatores e leiras) e a compostagem doméstica em composteiras domésticas. Que se enquadram nos três grandes grupos de compostagem (sistemas de leiras, sistemas fechados ou reatores biológicos, e os sistemas de compostagem doméstica), utilizando-se como resíduo principal os rejeitos de alimentos gerados no restaurante presente no campus da UNESP de Bauru, com outros resíduos estruturantes.

No presente trabalho, aborda-se no sistema de reator biológico, o método respirométrico, desenvolvido no projeto experimental realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Bauru, desde o ano de 2009, e que se utiliza de uma nova metodologia para avaliação e controle operacional do processo de compostagem, onde os parâmetros de degradação biológica dos resíduos são mensurados na fase gasosa, garantindo assim a homogeneidade dos resultados em tempo real, mostrando ser uma ferramenta superior às avaliações do processo de compostagem tradicionais (GEA, 2004; RODRIGUEZ *et al.*, 2012; SCOTON *et al.*, 2015), que se restringe basicamente a análise dos parâmetros a partir da fase sólida (amostras da massa compostada) e de temperatura, que é aferida aleatoriamente em meio heterogêneo e intervalos de tempo.

1.4 Fluxograma da pesquisa



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Buscou-se analisar as contribuições teóricas que serão utilizadas para a estruturação deste trabalho. Neste sentido, o referencial teórico está dividido em quatro seções, com temas relacionados aos resíduos sólidos e a compostagem, de acordo com o eixo que rege a pesquisa, de forma a compreender melhor a necessidade de comparar os processos de compostagem.

2.1 Resíduos sólidos

Com a formação e desenvolvimento das cidades, e ainda com a Revolução Industrial, que originou um importante crescimento urbano, teve início o uso intensivo dos recursos do planeta. A problemática da gestão dos resíduos agravou-se e começou a dar origem aos primeiros grandes problemas ambientais.

A preocupação com a destinação correta dos resíduos sólidos vem crescendo em todos os setores da sociedade, devido à intensificação da produção de lixo nos grandes centros urbanos e pela falta de ações adequadas do Poder Público e da própria população.

Segundo Wang e Wang (2013), existe um crescimento na geração dos resíduos, em consequência do aumento populacional. Em Pequim, por exemplo, a quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados, passou de 3,21 milhões de toneladas em 2002 para 6,35 milhões de toneladas em 2010 e a porcentagem de resíduos orgânicos aumentou de 45,77% em 2002 para 66,98% em 2010.

De acordo com Albuquerque *et al.* (2007), o lixo orgânico é todo lixo que tem origem animal ou vegetal, ou seja, que recentemente fez parte de um ser vivo. Esse tipo de lixo é considerado poluente e, quando acumulado, muitas vezes pode tornar-se altamente rejeitado devido ao mau cheiro, oriundo da sua decomposição. Os fenômenos naturais de decomposição ocorrem por ação inicial de microrganismos, cujo trabalho metabólico tem como resultante a água, o gás carbônico e energia térmica (CAMARGO, 2002).

Quanto às suas características físicas, segundo Albuquerque *et al.* (2007), os resíduos sólidos orgânicos são classificados como molhados. Geralmente, tem

composição constituída por restos de comida, cascas e bagaços de frutas e verduras, ovos, legumes, entre outros.

2.1.1 Definição e classificação

A definição de resíduos sólidos é bastante ampla. Para Pichtel (2005) os resíduos sólidos podem ser definidos como um material sólido com valores econômicos negativos que torna o descarte mais barato que seu uso. Esses resíduos são detritos de origens orgânicas, inorgânicas, inertes, radioativas, hospitalares, industriais e que se bem administrados, muitos deles podem ser diretamente aproveitados e/ou comercializados (ALBUQUERQUE *et al.*, 2007).

A Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010, a qual dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos no Brasil define resíduos sólidos como:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

A fonte dos resíduos sólidos é relacionada a sua origem, ou seja, de onde vêm (Tabela 1): residencial, comercial, institucional, construção e demolição, serviços municipais, centrais de tratamento, industrial e agrícola (TCHOBANOGLIOUS; KREITH, 2002), embora o termo implique em resíduos que são sólidos, alguns tipos podem ser excluídos devido às suas características, como os resíduos potencialmente perigosos e os radioativos (SMITH; SCOTT, 2005). No entanto, Pichtel (2005) prefere incluí-los, configurando desta forma as principais classes de resíduos: municipal, perigosos, industrial, médico, universal, construção e demolição, radioativo, mineração e agrícola.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos divide a fonte em: resíduos sólidos urbanos, da construção civil, das indústrias, agrossilvopastoris, de mineração, de serviços de saúde e de transportes (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012). A

Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 também classifica os resíduos sólidos de acordo com sua origem em:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios (BRASIL, 2010).

A mesma lei classifica os resíduos sólidos de acordo com a periculosidade, ou seja:

- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;

b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a” (BRASIL, 2010).

Tabela 1: Fontes dos Resíduos Sólidos.

Fonte	Instalações típicas, atividades ou locais onde os resíduos são gerados	Tipo de Resíduos Sólidos
Residencial	Domicílios de famílias únicas ou plurifamiliar; apartamentos de baixa, média e alta densidade; etc.	Restos de alimentos, papel, papelão, plásticos, têxteis, resíduos de quintal, madeira, cinzas, vidro alumínio, metais, resíduos especiais (como baterias, óleo, aparelhos eletrônicos e pneus) e resíduos domiciliares perigosos.
Comercial	Lojas, restaurantes, mercados, escritórios, hotéis, motéis, mecânica de carro, etc.	Papel, papelão, plástico, madeira, restos de alimentos, vidro, metal, cinzas, resíduos especiais, resíduos perigosos, etc.
Institucional	Escolas, hospitais, prisões, centros governamentais, etc.	Mesmo que o comercial.
Industrial (resíduos não processados)	Construção, fabricação, manufatura leve e pesada, refinarias, fábricas de produtos químicos, usinas de energia, demolição, etc.	Papel, papelão, plásticos, madeira, restos de alimentos, vidro, metal, cinzas, resíduos especiais, resíduos perigosos, etc.
Resíduos Sólidos Urbanos*	Todos os anteriores.	Todos os anteriores.
Construção e demolição	Novas construções, reparo de rodovias, demolição de edifícios, pavimentos quebrados, etc.	Madeira, aço, concreto, terra, etc.
Serviços municipais (excluindo instalações de tratamento)	Limpeza urbana, jardins, limpeza de bueiros, parques e praias, outras áreas de recreação, etc.	Resíduos especiais, entulho, detritos da rua, restos nos bueiros, resíduos em geral de parques, praias e áreas de recreação.
Instalações de tratamento	Água, esgoto, processos de tratamento industrial, etc.	Central de tratamento de resíduos, principalmente compostas de lodo residual e outros materiais.
Industrial	Construção, fabricação, manufatura leve e pesada, refinarias, fábricas de produtos químicos, usinas de energia, demolição, etc.	Resíduos de processos industriais, sucatas, etc; resíduos não industriais incluindo restos de alimentos, entulho, cinzas, resíduos de construção e demolição, resíduos especiais e perigosos.
Agrícola	Plantações, pomares, vinhas, laticínios, fazendas, criadouro de gado.	Restos de comida estragada, resíduos agrícolas, entulho e resíduos perigosos.

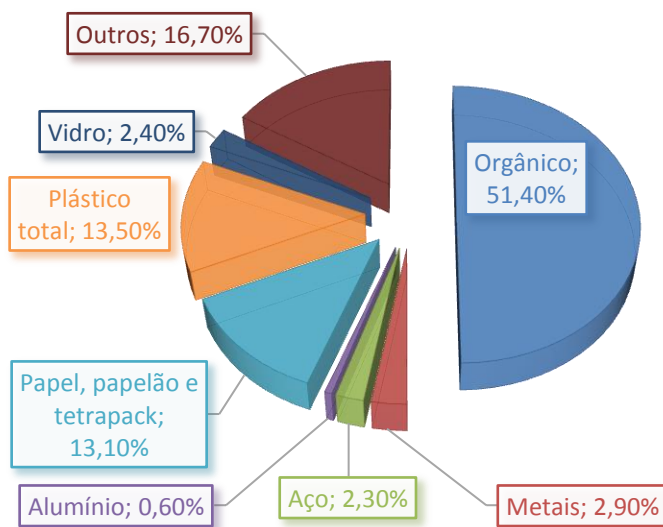
*O termo *Resíduos Sólidos Urbanos* (RSU) normalmente inclui todos os resíduos gerados na comunidade, com exceção dos gerados pelos serviços municipais, estação de tratamento e processos industriais e agrícolas.

Fonte: Tchobanoglous; Kreith (2002).

2.1.2 Composição e destinação final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

No Brasil, verifica-se na composição dos resíduos sólidos urbanos coletados, um alto percentual de material reciclável (31,9%), que é composto por vidros, plásticos, papel, aço e alumínio, e um percentual ainda maior de matéria orgânica, que corresponde a mais do que a metade do total coletado (51,4%), e que consiste em matéria prima para o processo de compostagem (MASSUKADO *et al.*, 2013). Na Figura 1 observa-se a composição física dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Figura 1: Composição física dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.



Fonte: Massukado *et al.* (2013).

Na Tabela 2 é apresentada a composição dos resíduos mais encontrados no Brasil no ano de 2008 e sua quantidade, expressa em toneladas por dia.

Tabela 2: Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008.

RESÍDUOS	(%)	QUANTIDADE (t/dia)
Material reciclável	31,9	58.527,40
Metais	2,9	5.293,50
Aço	2,3	4.213,70
Alumínio	0,6	1.079,90
Papel, papelão e tetrapak	13,1	23.997,40
Plástico total	13,5	24.847,90
Plástico filme	8,9	16.399,60
Plástico rígido	4,6	8.448,30
Vidro	2,4	4.388,60
Matéria orgânica	51,4	94.335,10
Outros	16,7	30.618,90
Total	100,0	183.481,50

Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012).

Na Tabela 3 observa-se uma estimativa da distribuição dos resíduos coletados nas regiões políticas brasileiras, bem como uma média da quantidade de resíduos gerados por habitante diariamente.

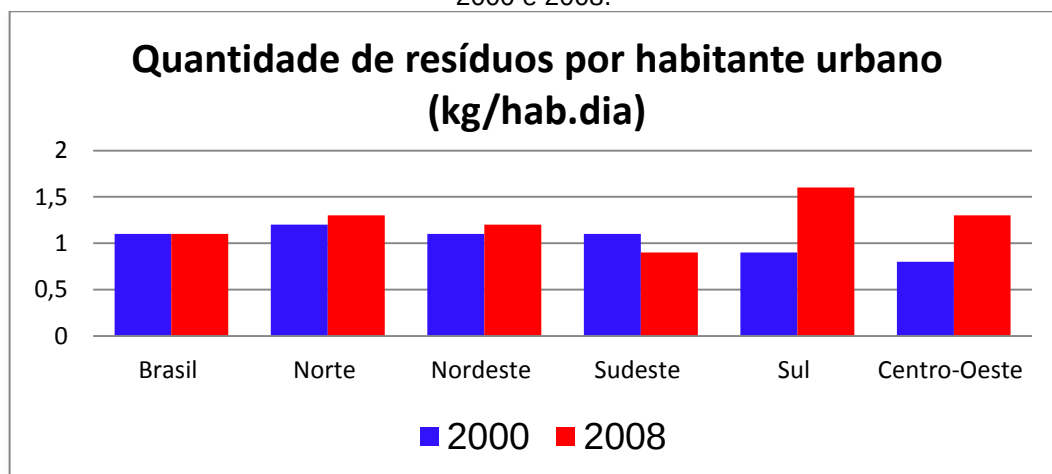
Tabela 3: Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos coletados no Brasil em 2000 e 2008.

Unidade de análise	Quantidade de resíduos coletados (t/dia)		Quantidade de resíduos por habitante urbano (kg/hab.dia)	
	2000	2008	2000	2008
Brasil	149.094,30	183.481,50	1,1	1,1
Norte	10.991,40	14.637,30	1,2	1,3
Nordeste	37.507,40	47.203,80	1,1	1,2
Sudeste	74.094,00	68.179,10	1,1	0,9
Sul	18.006,20	37.342,10	0,9	1,6
Centro-Oeste	8.495,30	16.119,20	0,8	1,3

Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012).

Observa-se que a região sudeste, apesar de ser a maior produtora de resíduos sólidos, quando se analisa a produção de resíduos por habitante/dia, é a única região que apresenta uma queda de geração de 1,1 kg/hab.dia para 0,9 kg/hab.dia. Na Figura 2 são evidenciadas estas estimativas de geração de resíduos sólidos:

Figura 2: Estimativa da quantidade de resíduos sólidos gerados no Brasil por habitante/dia em 2000 e 2008.



Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012).

Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, em relação à coleta seletiva de materiais recicláveis, entre 2000 e 2008 houve um aumento de 120% no número de municípios que desenvolvem tais programas, que chegaram a 994, sendo a maioria localizada nas regiões Sul e Sudeste. Este número, embora importante, ainda não ultrapassa 18% dos municípios brasileiros.

As estimativas apontam que a participação dos resíduos recuperados pelos programas de coletas seletivas formais, ainda é muito pequena, o que sugere que a reciclagem no país ainda é mantida pela coleta pós-consumo informal.

Quanto à compostagem, apesar de ser um tipo de destinação final ambientalmente adequada, ainda existe pouco desta tecnologia de tratamento aplicado no Brasil, no ano de 2008 apenas 3,8% dos municípios possuíam unidades de compostagem. E no estado de São Paulo, 2,8% de seus municípios possuem estas unidades (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2012). Tais dados mostram uma inadequada gestão quanto a este tipo de resíduo, pois representam grande parte dos resíduos gerados pela população.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos indica que, quanto à destinação dos resíduos sólidos urbanos, observa-se que mais de 90% dos resíduos são destinados para a disposição final em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, sendo apenas 10% restantes distribuídos entre unidades de compostagem, unidades de triagem e reciclagem, unidades de incineração, vazadouros em áreas alagadas e outros destinos (Tabela 4).

Tabela 4: Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2000 e 2008.

Destino Final	2000		2008	
	Quantidade (t/d)	%	Quantidade (t/d)	%
Aterro sanitário	49.614,50	35,4	110.044,40	58,3
Aterro Controlado	33.854,30	24,2	36.673,20	19,4
Vazadouros a céu aberto (Lixão)	45.484,70	32,5	37.360,80	19,8
Unidade de compostagem	6.364,50	4,5	1.519,50	0,8
Unidade de triagem para reciclagem	2.158,10	1,5	2.592,00	1,4
Unidade de incineração	483,10	0,3	64,80	<0,1
Vazadouro em áreas alagáveis	228,10	0,2	35,00	<0,1
Locais não fixos	877,30	0,6	SI	
Outra unidade	1.015,10	0,7	525,20	0,3
TOTAL	140.080,70		188.814,90	

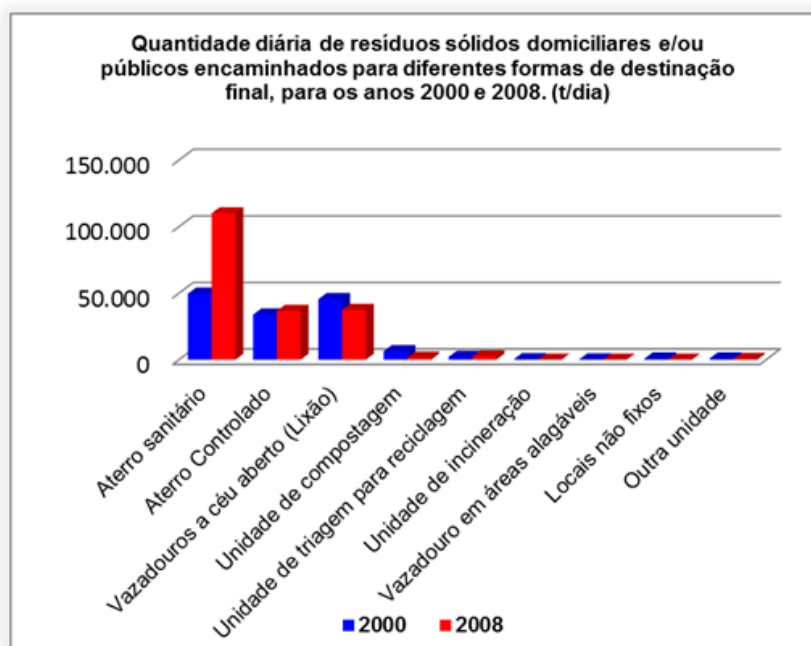
Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos sólidos (2012).

Apesar dos resíduos sólidos urbanos apresentarem alto percentual de matéria orgânica, as experiências de compostagem, no Brasil, são ainda principiantes. O resíduo orgânico, por não ser coletado separadamente, é encaminhado para disposição final, juntamente com os resíduos domiciliares. Aumentando assim, a quantidade de resíduos encaminhados aos aterros sanitários.

Do total de resíduos orgânicos que são coletados (94.335,10 t/d), somente 1,6% (1.509 t/d) é encaminhado para tratamento via compostagem. Tem-se 211 municípios brasileiros com unidades de compostagem, sendo que os Estados de Minas Gerais e Rio Grande do Sul possuem a maior concentração, 78 e 66 unidades respectivamente (BRASIL, 2010).

Na Figura 3 observa-se a destinação dos resíduos para unidades de compostagem, que em 2000 correspondeu a 4,5% como destinação final, caindo para 0,8% em 2008.

Figura 3: Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2000 e 2008.



Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2010).

Com relação à disposição final de resíduos e rejeitos no solo, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, foram classificadas a partir de três principais formas: aterro sanitário, aterro controlado e lixão.

O lixão é a forma inadequada de disposição final de resíduos e rejeitos, que consiste na descarga do material no solo sem qualquer técnica ou medida de controle. Diversos problemas tornam o lixão a solução menos indicada, por não ter nenhum tipo de proteção, esses locais se tornam vulneráveis à poluição causada pela decomposição do lixo, tanto no solo, quanto nos lençóis freáticos e no ar. O material despejado entra em processo de decomposição, produzindo o chorume e o gás metano. O chorume escorre e penetra na terra, chegando aos lençóis freáticos localizados abaixo do lixão e contaminando a água. Já o gás resultante da decomposição do lixo é formado por gases como metano, gás carbônico (CO_2) e vapor d'água, é liberado diretamente para a atmosfera sem antes passar por nenhum tipo de tratamento.

O aterro controlado, também é uma forma inadequada de disposição final de resíduos e rejeitos, no qual o único cuidado realizado é o recobrimento da massa de resíduos e rejeitos com terra diariamente, fazendo com que o lixo não fique exposto

e não atraia animais. Estes aterros são locais intermediários entre o lixão e o aterro sanitário. Trata-se geralmente de antigas células que foram remediadas e passaram a reduzir os impactos ambientais e a gerenciar o recebimento de novos resíduos. Recebem cobertura de argila e grama e fazem a captação dos gases e do chorume produzidos. O gás é capturado e queimado e parte do chorume é recolhido.

O aterro sanitário é a técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, que não causa danos à saúde pública e à sua segurança e minimiza os impactos ambientais. Segundo a PNRS, este método utiliza os princípios de engenharia (impermeabilização do solo, cercamento, ausência de catadores, sistema de drenagem de gases, águas pluviais e lixiviado) para confinar os resíduos e rejeitos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-o com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, quando necessário. As células são impermeabilizadas com mantas de policloreto de vinila (PVC) e o chorume é drenado e depositado em um poço, para tratamento futuro, usualmente em Estação de Tratamento de Esgoto. O biogás é drenado e pode ser queimado ou aproveitado para eletricidade.

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, a situação da disposição final pelo viés do número de unidades de disposição final nos municípios com presença de aterros sanitários, de aterros controlados e de lixões observou-se que, em 2000, 86% dos municípios encaminhavam seus resíduos e rejeitos para aterros controlados e lixões e, somente 14% dos municípios tinham aterros sanitários. Em 2008, apesar do aumento ocorrido no número de municípios que fazem a disposição final em aterros sanitários, vê-se que a maioria deles ainda dispõe seus resíduos e rejeitos em aterros controlados e lixões.

Perante este panorama apresentado pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos, ressalta-se a necessidade de se encontrar soluções imediatas para a disposição dos resíduos sólidos urbanos, pois ao voltar-se para a PNRS, verifica-se como principais pontos:

I – Prazo para que até 2014 não mais existam lixões a céu aberto no Brasil. No lugar deles, devem ser criados aterros controlados ou aterros sanitários;

II – Somente os rejeitos poderão ser encaminhados aos aterros sanitários, compreendendo-se como rejeitos aquela parte do lixo que não tem como ser

reciclado. Apenas 10% dos resíduos sólidos são rejeitos. A maioria é orgânica, que em compostagens pode ser reaproveitada e transformada em adubo, e reciclável, que deve ser devidamente separada para a coleta seletiva;

III – Elaboração de planos de resíduos sólidos nos municípios, com objetivo de direcionar prefeitos e cidadãos a descartar de forma correta o lixo.

2.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), “dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis” (BRASIL, 2010).

A PNRS estabelece o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, que envolve os diversos tipos de resíduos produzidos, alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação, bem como metas, projetos e ações. Apresentando conceitos e propostas que compatibilizam crescimento econômico e preservação ambiental com desenvolvimento sustentável (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012).

No Plano Nacional de Resíduos Sólidos, coloca-se a redução de resíduos sólidos urbanos úmidos dispostos em aterros sanitários, e o tratamento e recuperação de gases em aterros sanitários, tendo como uma das diretrizes induzir a compostagem da parcela orgânica dos resíduos sólidos urbanos e a geração de energia por meio do aproveitamento dos gases provenientes da biodigestão de composto orgânico e dos gases gerados em aterros sanitários (biogás).

Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, é observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Cabe ressaltar que os principais tópicos da PNRS envolvem boas práticas recomendadas por Massoud *et al.* (2003), tais como:

- Aumento da cobertura do serviço de coleta;

- Encerramento de lixões existentes;
- Introdução de aterros sanitários;
- Integração de sistemas como reciclagem, compostagem e/ou incineração;
- Introdução de taxas de serviço;
- Envolvimento do setor privado;
- Avaliação deliberada das responsabilidades dos vários atores, incluindo: famílias e outros usuários dos serviços, autoridades governamentais locais e nacionais, ONGs, empresas formais e informais, bem como as agências externas – o que resulta na responsabilidade compartilhada, conforme a PNRS.

2.3 Resíduos de alimentos

As indústrias agroalimentares geram uma grande quantidade de resíduos sólidos, que necessitam ser adequadamente geridos antes de serem lançados ao meio ambiente. Os resíduos sólidos, que se originam a partir do processamento de alimentos e indústrias agrícolas, são substratos adequados para a compostagem (ADHIKARI *et al.*, 2008 ; MANIOS, 2004).

O desperdício faz parte da cultura brasileira, prática de difícil modificação, que afeta a produção do país como um todo e gera danos para toda a sociedade. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) só 39% da produção agrícola nacional vira efetivamente comida no prato das pessoas, 20% se perdem no plantio e na colheita, 8% no transporte e armazenamento, 15% na indústria, 1% no varejo e 17% no consumidor. Estima-se que 39 milhões de quilos de alimentos são perdidos diariamente em residências, restaurantes, supermercados, açougues, indústrias, grandes centros de armazenagem, lavouras, etc.

A Tabela 5 apresenta os resíduos orgânicos gerados no restaurante da cantina presente na Faculdade de Engenharia da UNESP de Bauru, mesmo local onde foram coletados os resíduos utilizados nesta pesquisa (verduras, legumes e frutas), em quatro dias no mês de novembro de 2010.

Tabela 5: Resíduos orgânicos do restaurante da UNESP campus Bauru, expressos em (kg).

Data	Verdura	Legumes/frutas	Resto/Ingesta	Total	Refeições	Per capita
16/11	6,88	10,08	13,88	30,84	268	0,115
17/11	4,62	9,16	24,56	38,34	249	0,154
18/11	4,12	5,94	19,4	29,46	275	0,107
19/11	4,66	6,22	16,6	27,48	266	0,103
TOTAL	20,28	31,4	74,44	126,12	1058	0,119
MÉDIA	5,07	7,85	18,61	31,53	264,5	0,119
MÉDIA (%)	16	25	59			

Fonte: Scoton *et al.* (2012).

A quantidade de resíduos gerados no restaurante do campus mostra-se significativa, e não possuem uma destinação considerada ecologicamente correta. Em termos qualitativos, verifica-se que a utilização dos resíduos orgânicos de restaurante no processo de compostagem necessita, obrigatoriamente, da avaliação da relação carbono/nitrogênio (C/N) com o resíduo estruturante escolhido para ser utilizado no processo de co-compostagem (SCOTON *et al.*, 2012).

Os resíduos de alimentos são um tipo de resíduo rico em nutrientes e com grande umidade, sendo do ponto de vista da compostagem, um material potencialmente de rápida degradação, mas arriscado quanto à atração de vetores e que necessita ser misturado a resíduos menos úmidos e com relação C/N mais alta (INACIO, 2010).

Segundo Chanakya *et al.* (2007) os resíduos de alimentos decompõem-se rapidamente, produzindo ácidos orgânicos e uma grande fração de lixiviados, uma vez que o teor de umidade de restos de comida é geralmente mais de 80%, outros resíduos precisam ser adicionados, a fim de ajustar o teor de umidade da massa a ser compostada.

Estes resíduos se adequadamente compostados podem gerar toneladas de composto, e ser utilizado na agricultura, em jardins, canteiros, etc., diminuindo assim, o consumo dos adubos e fertilizantes convencionais, que é custoso tanto do ponto de vista econômico, quanto ambiental.

2.4 Compostagem

A compostagem não é uma prática recente. Sendo um método praticado desde épocas ancestrais pelo ser humano, para reproduzir o ciclo natural da matéria orgânica. Várias civilizações amontoavam em pilhas o material vegetal, estrume, restos de comida e outros resíduos orgânicos, e deixavam-nos decompor até estarem prontos para serem devolvidos ao solo. Entretanto, após a II Guerra Mundial, ocorreu um crescimento na utilização de fertilizantes químicos e os métodos tradicionais de fertilização acabaram caindo em desuso (SANTOS, 2007).

Segundo Bernal *et al.* (2009), a compostagem não pode ser considerada uma nova tecnologia, mas seu interesse vem crescendo entre as estratégias de gestão de resíduos, por ser uma opção adequada ambientalmente, sendo seu produto final utilizado como adubo, com ganhos econômicos e ambientais.

A definição de compostagem não é universal. Segundo Haug (1993), compostagem é definida como a degradação biológica e estabilização de substratos orgânicos sob condições aeróbicas e termófilas controladas, que leva à produção de um composto de elevada qualidade, que pode ser utilizado como fertilizante orgânico para o solo na agricultura. Este composto é dito como um excelente condicionador para o solo, melhorando suas propriedades físicas, químicas e biológicas, aumentando a sua capacidade de retenção de água e fornecimento de nutrientes (MARTÍNEZ- BLANCO *et al.*, 2010).

Em geral, o processo de compostagem pode ser dividido em duas fases principais: fase ativa e fase de maturação, também chamada de fase de cura (BERNAL *et al.*, 2009). A fase ativa é caracterizada pela rápida e intensa biotransformação aeróbia e por temperaturas elevadas, sendo desenvolvida em três etapas (KEENER *et al.*, 2000): (a) uma fase inicial durante 1-3 dias, na qual as bactérias mesófilas e fungos degradam compostos simples, tais como açúcares, aminoácidos e proteínas, aumentando rapidamente a temperatura; (b) a fase termofílica, na qual os microrganismos termofílicos degradam as gorduras, celulose, hemicelulose e lignina, ocorrendo durante esta fase, a degradação do máximo de matéria orgânica, juntamente com a destruição de agentes patogénicos; (c) a fase de arrefecimento, caracterizada por uma diminuição da temperatura, devido à redução da atividade microbiana, a massa de compostagem é re-colonizada por

organismos mesófilos, que são capazes de degradar os açúcares restantes, celulose e hemicelulose. A fase de acabamento, também de maturação, que se segue à fase ativa, é caracterizada como sendo uma fase de lenta e progressiva diminuição da temperatura.

Assim, o composto pode ser definido como o produto estabilizado e higienizado da compostagem, benéfico para o crescimento das plantas e que possui certas características húmicas, tornando a compostagem de resíduos uma questão-chave para a agricultura sustentável e da gestão de recursos (GAJALAKSHMI; ABBASI, 2008 ; HAUG, 1993).

Por ser uma digestão aeróbia de resíduos orgânicos, onde ocorre a degradação da matéria orgânica através de microrganismos, além da matéria orgânica é necessário, o oxigênio e água, produzindo dióxido de carbono, água e calor, pois trata-se de uma reação biológica exotérmica.

A Figura 4 mostra uma representação esquemática das entradas e saídas ocorridas no processo de compostagem.

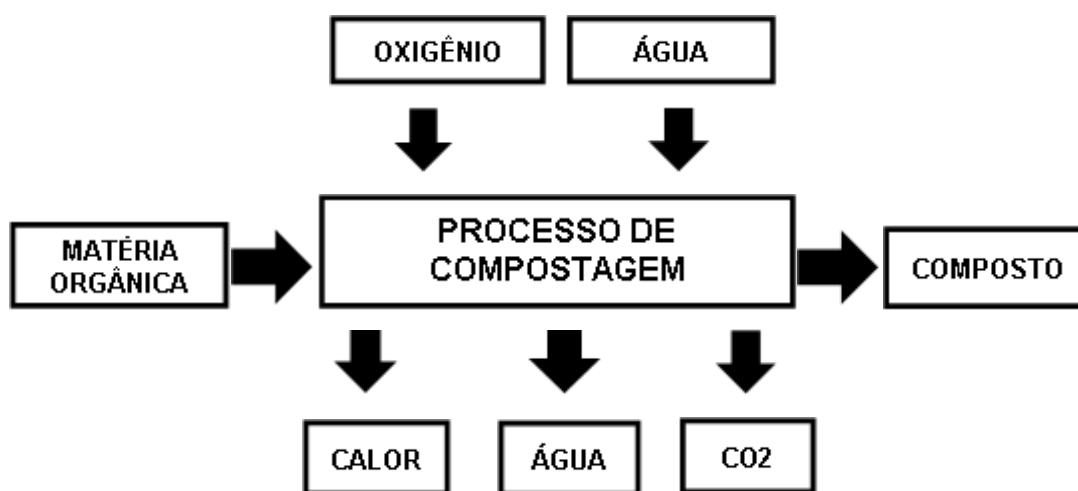


Figura 4: Representação das entradas e saídas do processo de compostagem.

Para que o processo de compostagem possa ser desenvolvido de modo satisfatório, é preciso que alguns parâmetros físico-químicos sejam respeitados garantindo um ambiente com condições favoráveis para a plena ação dos microrganismos na transformação da matéria orgânica. O controle de parâmetros tais como a granulometria do material a ser compostado, porosidade, tamanho de

partícula, teor de nutrientes, relação carbono/nitrogênio (C/N), temperatura, pH, teor de umidade e fornecimento de oxigênio demonstram ser a chave para a otimização da compostagem (AGNEW *et al.*, 2003; BERNAL *et al.*, 2009; DIAZ; SAVAGE, 2007; HAUG, 1993 ; RASHAD *et al.*, 2010).

2.4.1 Parâmetros físico-químicos que interferem no processo de compostagem

Segundo Bernal *et al.* (2009) os fatores que interferem no processo de compostagem podem ser divididos em dois grupos: aqueles em função da formulação da mistura de compostagem, como o equilíbrio de nutrientes, o pH, o tamanho de partícula, porosidade e umidade; e aqueles que dependem da gestão de processos, tais como a concentração de oxigênio, temperatura e teor de água.

No que diz respeito ao aspecto, não há muitos tipos de resíduos biodegradáveis que podem ser caracterizados como substratos ideais para compostagem, e a mistura com agentes químicos e / ou de volume é, muitas vezes, necessária (AN *et al.*, 2012 ; IQBAL *et al.*, 2010 ; YU; HUANG, 2009). Por outro lado, o substrato com as características físico-químicas ótimas para a compostagem pode ser obtido por mistura de dois ou mais tipos de resíduos biodegradáveis (DIAZ *et al.*, 2002; IQBAL *et al.*, 2010; RASHAD *et al.*, 2010; SUNDBERG *et al.*, 2011 ;), o que se denomina de co-compostagem, ou seja, a compostagem realizada com a combinação de dois ou mais resíduos orgânicos, com propriedades e composição diferentes.

2.4.1.1 Aeração

A aeração é um fator essencial para a compostagem. Para Fernandes e Silva (1999), uma vez que a compostagem é um processo aeróbio, o fornecimento de ar é vital à atividade microbiana, pois os microrganismos aeróbios têm necessidade de O_2 para oxidar a matéria orgânica que lhes serve de alimento. Durante a compostagem, a demanda por O_2 pode ser bastante elevada e a falta deste elemento pode se tornar um fator limitante para a atividade microbiana e

prolongar o ciclo de compostagem. Segundo Miller (1992), a concentração ideal de oxigênio está entre 15% e 20%.

O arejamento adequado controla a temperatura, remove o excesso de umidade e de CO_2 , além de fornecer O_2 para os processos biológicos. Para Pereira Neto (1996) o arejamento é o fator mais importante para o controle de diversos parâmetros da compostagem, haja vista que o mesmo proporciona, além do suprimento de oxigênio aos microrganismos, o controle da temperatura e umidade, e consequente remoção de odores, pois quando há falta de aeração o sistema pode tornar-se anaeróbio.

De acordo com Haug (1993) o oxigênio é necessário aos microrganismos no processo de obtenção de energia resultante da oxigenação do carbono orgânico.

Qualquer que seja a tecnologia utilizada, a aeração da mistura é fundamental no período inicial da compostagem, na fase de degradação rápida, onde a atividade microbiana é intensa. Na fase seguinte, a maturação, a atividade microbiana se torna mais lenta, logo a necessidade de aeração é bem menor.

2.4.1.2 Temperatura

A temperatura é um sinalizador da atividade microbiana e do processo de compostagem, uma vez que os microrganismos possuem metabolismo exotérmico, ou seja, realizam a decomposição da matéria orgânica gerando calor e elevando a temperatura nos sistemas (KIEHL, 2004). Sendo assim, a produção de calor de um material é indicativo da atividade biológica e, por isso, indiretamente do seu grau de decomposição (HAUG, 1993).

A temperatura é um fator indicativo do equilíbrio biológico, de fácil monitoramento e que reflete a eficiência do processo. A compostagem aeróbia pode ocorrer tanto em regiões de temperatura termofílica (45 °C a 85°C) como mesofílica (25°C a 43°C).

A gama de temperatura ideal para a compostagem é de 40-65 °C (BERTOLDI *et al.*, 1983), as temperaturas acima de 55 °C são necessárias para a eliminação dos microrganismos patogênicos. Elevadas temperaturas durante o processo de compostagem levam à destruição de sementes de ervas daninhas, microrganismos patogênicos, larvas de insetos e vermes (GAJALAKSHMI, 2008).

Mas, se a temperatura alcançada for superior ao intervalo de tolerância dos decompositores termófilos, o efeito é prejudicial para a compostagem. A gama de 52-60 °C é o mais favorável para a decomposição (Miller, 1992). Sendo a regulação da temperatura necessária para a compostagem controlada.

Segundo Epstein (1997) as variações de temperatura são responsáveis pela alternância das diferentes populações bacterianas presentes na massa de resíduos. As faixas de temperatura que definem a predominância de determinados grupos de organismos podem ser classificadas em: criófilas (temperatura ambiente), mesófilas (até 55°C) e termófilas (acima de 55°C). Temperaturas acima de 70°C não são aconselháveis, visto que nesta faixa a atividade dos microrganismos torna-se reduzida, resultando na paralisação do processo e, conseqüentemente, no declínio da temperatura (KIEHL, 1998).

A remoção de calor em excesso pode ser alcançada através de várias estratégias (MILLER, 1992): controlar o tamanho e a forma da massa de compostagem; melhorar a refrigeração e remoção de calor por meio de resfriamento da evaporação; ventilação; aeração, entre outras.

2.4.1.3 Umidade

Para Kiehl (1998), como a compostagem é um processo biológico de decomposição da matéria orgânica, a presença de água é imprescindível para as necessidades fisiológicas dos organismos, os quais não vivem na ausência de umidade.

O teor de água ideal para a compostagem varia de acordo com os resíduos a serem compostados, mas em geral, a mistura deve ser de 50-60% (GAJALAKSHMI; ABBASI, 2008). Sendo importante para a manutenção de uma porosidade adequada à passagem livre do ar, para oxigenação do material.

Quando o teor de umidade está superior a 60% a atividade dos microrganismos é prejudicada, e o processo tende a tornar-se anaeróbio (DAS; KEENER, 1997). O ajuste da umidade pode ser feito pela criteriosa mistura de materiais e pela adição de água, ou ainda se intensificando a aeração da massa compostada.

Conforme Fernandes e Silva (1999) como há perda de água devido à aeração, em geral, o teor de umidade do composto tende a diminuir ao longo do processo. O teor de umidade é um dos parâmetros que devem ser monitorados durante a compostagem para que o processo se desenvolva satisfatoriamente.

Assim, elevados teores de umidade, ou seja, maiores que 65%, fazem com que a água ocupe os espaços vazios do meio, impedindo a livre passagem do oxigênio. Se o teor de umidade de uma mistura é inferior a 40%, a atividade biológica é inibida, bem como a velocidade de biodegradação (FERNANDES; SILVA, 1999).

2.4.1.4 Relação Carbono/Nitrogênio (C/N)

O equilíbrio de nutrientes é, principalmente, definido pela relação C/N. Os microrganismos do processo de compostagem necessitam de uma fonte de energia, originária do Carbono, e do Nitrogênio para o seu desenvolvimento e atividade, na síntese de proteínas. É por esta razão que a relação C/N é considerada como fator que melhor caracteriza o equilíbrio dos substratos.

A proporção adequada de C/N para a compostagem está no intervalo 25-35, porque se considera que os microrganismos necessitam de 30 partes de C por unidade de N (BERNAL *et al.*, 2009). Diaz e Savage (2007) apresentam razão preferível do substrato entre 25 e 30, sendo a compostagem dos resíduos com relação C / N inferior a 20 viável, mas com perda de nitrogênio por volatilização de amônia durante o processo (Kumar *et al.*, 2010). Relações C/N inferiores, ou seja, onde há excesso de nitrogênio, também não são favoráveis ao processo de compostagem, visto que nesses casos há o desprendimento de amônia e consequente liberação de odores desagradáveis ao meio.

Tanto a falta de nitrogênio quanto a falta de carbono limita a atividade microbiológica. Se a relação C/N for muito elevada os microrganismos não encontrarão N suficiente para a síntese de proteínas e terão seu desenvolvimento limitado. Como resultado, o processo de compostagem será mais lento (FERNANDES; SILVA, 1999).

Conforme Kiehl (1985), durante a compostagem, a degradação da matéria orgânica leva a uma redução do carbono orgânico. O nitrogênio total, ou seja, o

nitrogênio orgânico, nítrico e amoniacal, aumenta em virtude da mineralização, consequentemente, ocorre uma diminuição da relação C/N. Assim, ao final do processo de compostagem esta relação chega a valores entre 8 e 12 (KIEHL, 1998). A Instrução Normativa nº 23/2005 do Ministério da Agricultura estabelece uma relação C/N final no valor máximo de 18.

A Tabela 6 apresenta a composição de alguns materiais orgânicos que são empregados no processo de compostagem, onde se observa a relação carbono/nitrogênio de cada um deles.

Tabela 6: Composição de alguns materiais empregados no preparo do composto (resultados em material seco a 110 °C).

MATERIAL	M.O. (g/kg)	C/N	C (g/kg)	N (g/kg)	P ₂ O ₅ (g/kg)	K ₂ O (g/kg)
Abacaxi (fibras)	714,1	44/1	396,0	9,0	-	4,6
Arroz (cascas)	850,0	63/1	472,5	7,5	1,5	5,3
Arroz (palhas)	543,4	39/1	304,2	7,8	5,8	4,1
Bagaço de cana	585,0	22/1	327,8	14,9	2,8	9,9
Bagaço de laranja	225,1	18/1	127,8	7,1	1,8	4,1
Banana (talos e cachos)	852,8	61/1	469,7	7,7	1,5	5,3
Banana (folhas)	889,9	19/1	490,2	25,8	1,9	-
Borra de café (solúvel)	867,9	25/1	477,5	19,1	1,7	0,2
Cacau (películas)	911,0	16/1	518,4	32,4	14,5	37,4
Cacau (cascas do fruto)	886,8	38/1	486,4	12,8	4,1	25,4
Capim-colonião	910,3	27/1	504,9	18,7	5,3	-
Capim-gordura-catingueiro	923,8	81/1	510,3	6,3	1,7	-
Capim-guiné	887,5	33/1	491,7	14,9	3,4	-
Capim-jaraguá	905,1	64/1	505,6	7,9	2,7	-
Capim-limão (cidreira)	915,2	62/1	508,4	8,2	2,7	-
Capim-milhão roxo	916,0	36/1	504,0	14,0	3,2	-
Capim-mimoso	936,9	79/1	521,4	6,6	2,6	-
Capim-pé-de-galinha	869,9	41/1	479,7	11,7	5,1	-
Capim-de-rhodes gigante	894,8	37/1	503,2	13,6	6,3	-
Cápsulas de mamona	943,3	44/1	519,2	11,8	2,9 1	8,1
Casca semente de algodão	959,8	78/1	530,4	6,8	0,6	12,0

MATERIAL	M.O. (g/kg)	C/N	C (g/kg)	N (g/kg)	P ₂ O ₅ (g/kg)	K ₂ O (g/kg)
Crotalaria juncea	914,2	26/1	507,0	19,5	4,0	13,1
Esterco de carneiro	564,9	15/1	319,5	21,3	12,8	26,7
Esterco de coqueira	458,8	18/1	252,0	14,0	5,2	7,4
Esterco de gado	621,1	18/1	345,6	19,2	10,1	16,2
Esterco de galinha	540,0	10/1	304,0	30,4	47,0	18,9
Esterco de porco	462,8	10/1	254,0	25,4	49,3	23,5
Feijão guandu	959,0	29/1	524,9	18,1	5,9	11,4
Feijão de porco	885,4	19/1	484,5	25,5	5,0	24,1
Feijoeiro (palhas)	946,8	32/1	521,6	16,3	2,9	19,4
Fumo (resíduos)	709,2	18/1	390,6	21,7	5,1	27,8
Grama batatais	908,0	36/1	500,4	13,9	3,6	-
Grama seca	905,5	31/1	502,2	16,2	6,7	-
Lab Lab	884,6	11/1	501,6	45,6	20,8	-
Mandioca (folhas)	916,4	12/1	522,0	43,5	7,2	-
Mandioca (ramas)	952,6	40/1	524,0	13,1	3,5	-
Mandioca (cascas raíz)	589,4	96/1	326,4	3,4	3,0	4,4
Mamona (cápsulas)	946,0	53/1	625,4	11,8	3,0	18,1
Milho (palhas)	967,5	112/1	537,6	4,8	3,8	16,4
Milho (sabugos)	452,0	101/1	525,2	5,2	1,9	9,0
Mucuna preta	906,8	22/1	492,8	22,4	5,8	29,7
Palha de café	999,9	31/1	511,5	16,5	1,8	18,9
Palha de feijão	946,8	32/1	521,6	16,3	2,9	19,4
Polpa de sisal	673,7	27/1	372,6	13,8	4,7	8,8
Serrapilheira	306,8	17/1	163,2	9,6	0,8	1,9
Serragem de madeira	934,5	865/1	519,0	0,6	0,1	0,1
Torta de babaçu	953,5	14/1	518,0	37,0	19,5	10,9
Torta de coco	945,9	12/1	524,4	43,7	18,8	31,4
Torta de usina de açúcar	787,8	20/1	438,0	21,9	23,2	12,3
Turfa	398,9	57/1	222,3	3,9	0,1	3,2

M.O. – matéria orgânica; C/N – relação carbono-nitrogênio.

*o teor de C (g/kg) foi calculado com base na relação C/N e teores de N informados pelo autor.

Fonte: Adaptado de Kiehl (1985).

2.4.1.5 Granulometria do material

A granulometria, ou, o tamanho de partícula dos resíduos é importante para o equilíbrio da área de superfície, para o crescimento de microrganismos e para a manutenção da porosidade adequada, permitindo o arejamento do sistema de compostagem. Pode ser definida como a proporção relativa dos diferentes grupos de tamanho de partículas existentes e separáveis por peneiramento, constituindo-se em um importante fator de influência para o processo de compostagem de resíduos sólidos (KIEHL, 1998).

Sistemas com partículas grandes não se decompõe de forma adequada, porque o interior das partículas tem acessibilidade difícil para os microrganismos (BERNAL *et al.*, 1993). No entanto, as partículas que são muito pequenas podem compactar a massa, reduzindo a porosidade.

A porosidade do substrato exerce uma grande influência sobre o desempenho da compostagem, dando condições adequadas no ambiente físico para a distribuição de ar, o que deve ser mantida durante o processo. A porosidade superior a 50% faz com que o sistema de compostagem permaneça com temperaturas baixas, porque a energia perdida excede o calor produzido. E pouca porosidade leva a condições anaeróbicas e geração de odor. A porcentagem de espaço de poros cheios com ar na compostagem deve estar no intervalo de 35-50% (BERNAL *et al.*, 2009).

O tamanho de partícula dos resíduos para compostagem está no intervalo de 10 mm (em sistemas de aeração forçada) a 50-100 mm (em sistemas de aeração passiva) (NEKLYUDOV *et al.*, 2008). Se o tamanho da partícula é demasiado pequeno, a recirculação do ar através da massa de compostagem é inibida, o espaço de ar livre no sistema diminui e reduz a difusão de oxigênio (VLYSSIDES *et al.*, 2008).

2.4.1.6 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH é tido como um parâmetro que afeta os sistemas de compostagem. A reação da matéria orgânica é geralmente ácida. Assim, ao se iniciar a decomposição, ocorre uma fase fitotóxica pela formação de ácidos orgânicos que tornam o meio mais ácido do que o da própria matéria-prima original. No entanto,

esses ácidos orgânicos e os traços de ácidos minerais que se formam, reagem com bases liberadas da matéria orgânica, gerando compostos de reação alcalina (MARAGNO *et al.*; 2007).

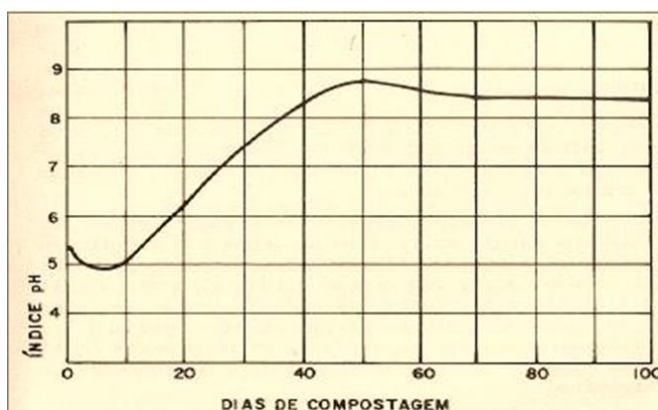
Assim, o pH do composto se eleva à medida que o processo se desenvolve, passando pelo pH 7,0 e alcançando pH superior a 8,0, enquanto contiver nitrogênio amoniacal (MARAGNO *et al.*, 2007).

Segundo Fernandes e Silva (1999) os níveis de pH muito baixos ou muito altos reduzem ou até inibem a atividade microbiana e que quando são utilizadas misturas com pH próximo da neutralidade, o início da compostagem (fase mesófila) é marcado por uma queda sensível de pH, variando de 5,5 a 6,0, devido à produção de ácidos orgânicos. Já quando a mistura apresentar pH próximo de 5,0 ou ligeiramente inferior há uma diminuição drástica da atividade microbiológica e o composto pode não passar para a fase termófila. A passagem à fase termófila é acompanhada de rápida elevação do pH, que se explica pela hidrólise das proteínas e liberação de amônia. Assim, normalmente o pH se mantém alcalino (7,5-9,0), durante a fase termófila.

Um valor de pH entre 5,5 e 8,5 é ótimo para os microrganismos de compostagem, mas os valores preferidos situam-se entre 6,5 e 7,5. Valores fora da faixa ideal poderiam inibir a atividade microbiana e atraso inicial na taxa de compostagem, limitando o processo (SUNDBERG *et al.*, 2004; YU; HUANG, 2009).

A Figura 5 apresenta, segundo Kiehl (1985) a variação do pH ao longo do processo de compostagem.

Figura 5: Variação do pH ao longo do processo de compostagem.



Fonte: Kiehl (1985).

Nota-se que durante as primeiras horas do processo o pH decresce até valores próximos a 5,0, aumentando, posteriormente, ao longo do processo, de forma gradual, alcançando valores próximos ao intervalo entre 8,0 – 9,0, ao final do período de compostagem.

2.4.2 Características do composto orgânico

Em relação à compostagem de resíduos sólidos orgânicos pode se observar que ao final do processo são gerados dois importantes componentes: sais minerais, contendo nutrientes para as raízes das plantas e húmus, condicionador e melhorador das propriedades físicas, físico-químicas e biológicas do solo (KIEHL,1985).

Observa-se que o benefício da matéria orgânica no solo não é apenas o de fornecedor de nutrientes para as plantas, mas principalmente de modificador, com o intuito de melhorar suas propriedades físicas e biológicas (EMBRAPA, 2004).

A eficácia do composto no que diz respeito aos efeitos benéficos sobre a física do solo, as propriedades químicas e biológicas, bem como constituindo uma fonte de nutrientes, depende da qualidade do composto. Os critérios de qualidade do composto são estabelecidos em termos de: teor de nutrientes, grau de humificação e estabilização da matéria orgânica, o grau de maturidade, a higienização e a presença de certos compostos tóxicos, como metais pesados (BERNAL *et al.*, 2009).

Conforme Lasaridi *et al.* (1998), a qualidade do composto orgânico produzido depende de diversos fatores, tais como tamanho de partículas dos resíduos, umidade, teor de matéria orgânica, teor de carbono, concentração de nitrogênio, fósforo e potássio, metais pesados, salinidade, porosidade, microrganismos patogênicos e grau de estabilidade do composto, capacidade de troca catiônica, capacidade de retenção de água, condutividade elétrica e substâncias húmicas.

Porém, em todas essas esferas, há a preocupação comum no que diz respeito à umidade, à concentração de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) e matéria orgânica e ao conteúdo de inertes (KIEHL, 2004). Segundo Kiehl (1985), as concentrações de NPK e matéria orgânica são importantes para o valor do

composto, à medida que representam também uma forma de se avaliar a sua qualidade e calcular seu valor de mercado comparando-se aos adubos químicos.

Durante o processo de compostagem, a transformação do substrato é condicionada pela natureza da matéria orgânica, de acordo com a sua degradabilidade (Haug, 1993), esta propriedade afeta a taxa de decomposição, de emissões de gás, duração e extensão do processo e as necessidades de oxigênio.

Compostos orgânicos, como hidratos de carbono simples, gorduras e aminoácidos, são degradados rapidamente no primeiro estágio de compostagem, já outros substratos orgânicos mais resistentes, tais como celulose, hemicelulose e lignina são parcialmente degradados e transformados, a uma taxa inferior. O sistema utilizado, as condições de compostagem e as características, tanto do material principal e do agente de volume adicionado para compostagem, e até mesmo as condições ambientais da época (inverno ou verão) têm uma grande influência sobre a mineralização da matéria orgânica durante compostagem (PARKINSON *et al.*, 2004).

O principal requisito de um composto para ser utilizado de forma segura no solo é um elevado grau de estabilidade ou maturidade, o que implica um teor de matéria orgânica estável e ausência de compostos fitotóxicos e patógenos de plantas ou animais. A maturidade é associada com o potencial de crescimento para plantas ou fitotoxicidade (IANNOTTI *et al.*, 1994), enquanto que a estabilidade é muitas vezes relacionada com a atividade microbiana do composto. No entanto, a estabilidade e a maturidade estão geralmente relacionadas, uma vez que os compostos fitotóxicos são produzidos pelos microrganismos em compostos instáveis (ZUCCONI *et al.*, 1985).

Um composto insuficientemente maduro tem uma forte demanda por O_2 e altas taxas de produção de CO_2 , devido ao intenso desenvolvimento de microrganismos, como consequência da abundância de compostos facilmente biodegradáveis na matéria-prima. Por esta razão, o consumo de O_2 e a produção de CO_2 são indicativos de estabilidade do composto e maturidade (BARRENA-GOMEZ *et al.*, 2006; IANNOTTI *et al.*, 1994).

As características físicas, como cor, odor e temperatura apresentam uma ideia geral do estágio de decomposição, mas dão pouca informação no que diz

respeito ao grau de maturação. Os métodos químicos de avaliação são amplamente utilizados.

A Tabela 7 apresenta as principais diferenças entre os compostos estabilizado e não estabilizado.

Tabela 7: Diferenças entre composto estabilizado e composto não estabilizado.

Composto estabilizado	Composto não estabilizado
Nitrogênio como íon nitrato	Nitrogênio como íon amônio
Enxofre como íon sulfato	Enxofre ainda em parte como íon sulfídrico
Baixa demanda de oxigênio	Alta demanda de oxigênio
Sem perigo de putrefação	Perigo de putrefação
A mineralização é cerca de 50%	Altas concentrações de substâncias orgânicas não mineralizadas
Alta capacidade de retenção de água	Baixa capacidade de retenção de água

Fonte: Barreira (2005).

2.4.3 Diferentes processos de compostagem

Os processos de compostagem têm sido classificados, basicamente, segundo três características: disponibilidade de oxigênio (aeróbios e anaeróbios), temperatura (mesófilos e termófilos) e tecnologia adotada (abertos ou sistemas fechados). Mazzer *et al.* (2004), apresenta na Tabela 8 as seguintes classificações:

Tabela 8: Classificações dos processos de compostagem.

Classificação quanto à Biologia:	
Aeróbio	A compostagem aeróbia corresponde ao processo de compostagem na presença de oxigênio, sendo normalmente considerado que a taxa de arejamento necessária a manter um processo aeróbio é aquele que permite manter o nível de oxigênio disponível para os processos biológicos acima dos 5 %. Neste processo existe o desprendimento de CO ₂ e vapor d'água, onde a temperatura é sempre elevada.

Anaeróbio	A digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos tem sido designada de compostagem anaeróbia por alguns autores, consistindo no processo de degradação de matéria orgânica na ausência de oxigênio, caracterizada pela ocorrência de bio-transformações anaeróbias. É cada vez mais aceitável a designação de fermentação anaeróbia para esta decomposição. Os principais argumentos a favor deste tipo de decomposição são a possibilidade de aproveitamento de parte do carbono sob a forma de metano (CH_4). Este gás pode ser aproveitado sob a forma de energia, elétrica ou vapor, de fácil utilização em instalações industriais. Neste processo a temperatura permanece baixa.
Misto	Processo onde a matéria passa pela fermentação aeróbia e depois existe uma redução de oxigênio desenvolvendo-se assim o processo anaeróbio.

Classificação quanto a Temperatura

Criofílico	Processo onde a temperatura atinge uma média inferior, próxima à do ambiente.
Mesofílico	Processos biológicos envolvidos na compostagem classifica como mesofílicos os microrganismos que têm a capacidade de se desenvolver a temperaturas de 15 a 45°C. A temperatura nesses processos são diretamente proporcionais a quantidade de microorganismos.
Termofílico	Processos biológicos envolvidos na compostagem classifica como termofílicos ao grupo de microrganismos que se desenvolvem a temperaturas entre os 45 e 65°C e que, se mostram incapazes de se desenvolverem a temperaturas inferiores a 40°C. É o mais indicado, pois, as altas temperaturas podem diminuir a sobrevivência de microrganismos patogênicos.

Classificação quanto ao ambiente

Aberto	Processo onde a compostagem ocorre em pátio a céu aberto.
Fechado	Processo onde a compostagem ocorre em digestores, bioestabilizadores, células de fermentação, etc.

Classificação quanto ao Processamento	
Estático	Processo onde o revolvimento da massa em fermentação é feita com intervalos.
Dinâmico	Processo onde a massa em digestão é revolvida continuamente.

Fonte: Mazzer *et al.* (2004).

Segundo Fernandes e Silva (1999), os processos de compostagem podem ser divididos em três grandes grupos: sistema de leiras revolvidas (*windrow*); sistema de leiras estáticas aeradas (*static pile*) e sistemas fechados ou reatores biológicos (*in-vessel*). Os dois primeiros sistemas são realizados, geralmente, ao ar livre, sendo alguns casos realizados em locais cobertos. O processo em reatores biológicos apresenta diversas alternativas de reatores e níveis de automação.

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

2.4.3.1 Sistemas de leiras

Para Fernandes e Silva (1999), a compostagem em leiras (revolvidas e estáticas aeradas) é um sistema muito utilizado em unidades de compostagem e em escala industrial. Sendo o de leiras revolvidas o mais simples e tradicional, onde a mistura dos resíduos a serem compostados é disposta em longas leiras (pilhas) que são periodicamente revolvidas, manualmente ou por máquinas específicas. A aeração é feita pela difusão e convecção do ar na massa do composto. No momento em que é realizado o revolvimento, o composto entra em contato com a atmosfera rica em O_2 , o que permite suprir momentaneamente as necessidades de aeração do processo biológico.

As máquinas específicas para misturar e revolver o composto, são, por exemplo: tratores agrícolas, sendo alguns já fabricados no Brasil; equipamentos auto-propelidos, que se deslocam sobre a leira de composto e realizam o

revolvimento, deixando as leiras com dimensões padrão, fixadas pelo modelo do equipamento; e pás carregadeiras convencionais. Durante a compostagem, as leiras devem ser revolvidas no mínimo três vezes por semana (Kuter, 1995). A Figura 6 apresenta exemplos de leiras revolvidas.

Figura 6: Sistemas de leiras revolvidas, por máquina (esquerda) e manual (direita).



Fonte: <http://www.cnph.embrapa.br>.

Já nas leiras estáticas aeradas, a mistura de resíduos é colocada sobre uma tubulação perfurada, conectada a um soprador industrial. A aeração necessária será fornecida por este sistema de injeção de ar sob pressão ou por sucção. A aeração deve ser dimensionada de acordo com os objetivos visados, que podem ser: satisfazer às demandas de oxigênio do processo de biodegradação aeróbia; remover o excesso de umidade; e remover o excesso de calor para manter a temperatura em torno de 60°C. De acordo com os objetivos fixados, as necessidades de aeração podem variar. Sendo um sistema bastante utilizado nos Estados Unidos (United States Environmental Protection Agency – USEPA).

A demanda de oxigênio também varia de acordo com a fase do processo de compostagem, sendo pequena nos primeiros dias e crescendo logo após a instalação da fase termófila. Em seguida, quando a temperatura diminui novamente a patamares mesófilos, o consumo de oxigênio cai também. Após a fase termófila, o composto pode ser transportado para outro local, onde será realizada a maturação, que deve durar em torno de 60 dias. Nesta fase as necessidades de oxigenação são baixas e o composto pode ficar em leiras sem aeração, sendo revolvido a cada 20-25 dias (FERNANDES; SILVA, 1999).

A Figura 7 apresenta exemplos de leiras estáticas aeradas.

Figura 7: Sistemas de leiras estáticas aeradas.



Fonte: <http://www.waternut.org/moodle>.

A altura e seção das leiras (revolvidas e estáticas aeradas) dependem do resíduo estruturante e do método de construção da leira, as dimensões variam de acordo com a quantidade de resíduos a serem compostados, não se devendo ter leiras menores que $1,0 \text{ m}^3$ (1,0 m de altura x 1,0 m de largura x 1,0 m de comprimento), que dificultam a manutenção das condições ideais da compostagem (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

2.4.3.2 Sistemas de reatores biológicos

Na compostagem em reatores biológicos, os resíduos são colocados dentro de sistemas fechados, que permitem o controle de todos os parâmetros do processo, o que conferiu à compostagem em reatores, a denominação de “compostagem acelerada”.

E devido à homogeneidade do ambiente, inclusive relacionado à temperatura, a compostagem em reatores biológicos também é tida como eficiente no controle dos patógenos. Outra vantagem é que essa alternativa promove o controle de odores, já que o sistema é fechado e a aeração é controlada. A aeração é feita sob pressão, e como o sistema é fechado, também é mais fácil monitorar a taxa de aeração e adequá-la às necessidades do processo (FERNANDES; SILVA, 1999).

Segundo os autores, o processo de compostagem em reator depende mais de equipamentos mecânicos do que os sistemas de leiras, sendo que, sua

sofisticação tecnológica varia de acordo com os fabricantes dos reatores e da escala da usina de compostagem. Em geral, os reatores se enquadram em três grandes categorias: reatores de fluxo vertical; reatores de fluxo horizontal e reatores de batelada.

Os reatores de fluxo vertical são formados por sistemas verticais onde os resíduos, geralmente, entram pela parte superior e percorrem o reator no sentido descendente. O ar pode ser injetado em vários níveis ou apenas na parte inferior do reator. Os de fluxo horizontal apresentam, geralmente, forma cilíndrica e são dispostos horizontalmente. Por estas características são conhecidos como túneis. Os resíduos entram por uma extremidade do reator e saem pela outra, com tempo de detenção suficiente para a realização da fase termófila. O ar é injetado sob pressão ao longo do trajeto.

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

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

Mesmo a compostagem em reatores tendo uma fase termófila mais rápida e intensa, após seu final, o composto ainda deve passar por um período de maturação de mais ou menos 60 dias, tal como descrito para os sistemas anteriores, antes de ser utilizado no solo.

Verifica-se através da Figura 8, um exemplo do processo de compostagem através de reatores biológicos, no caso, de batelada.

Figura 8: Compostagem através de sistemas fechados ou reatores biológicos (*in-vessel*).



Fonte: <http://www.epd.gov.hk>.

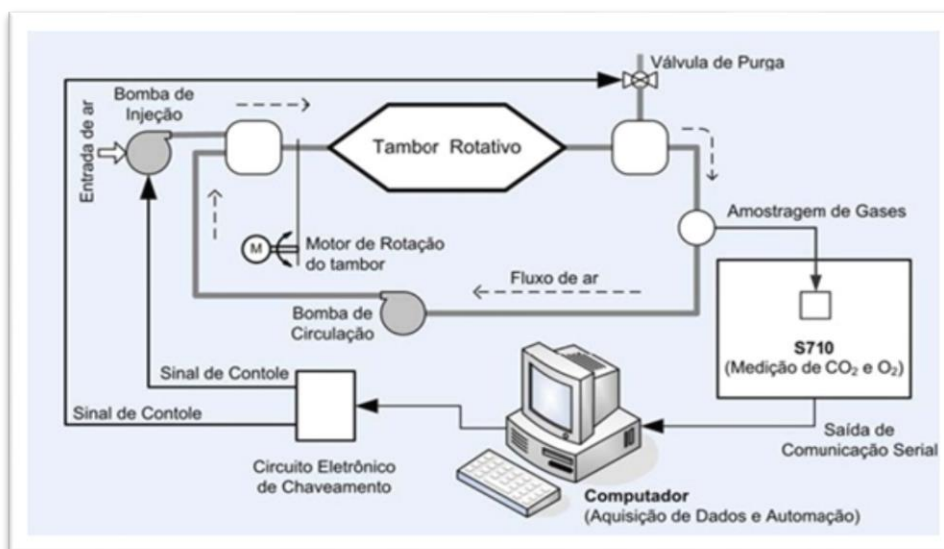
Os reatores giratórios têm sido apontados como uma tecnologia promissora, trazendo vantagens como aeração e mistura, o que possibilita um composto mais homogêneo, sem produção de odores e sem percolação do chorume para o solo durante o processo (KALAMDHAD *et al.*, 2008; KLEMES *et al.*, 2012). Até o presente ainda não há uma regulamentação sobre a estabilidade biológica dos compostos e existem poucos estudos sobre formas de otimizar as variáveis envolvidas para agilizar o processo de compostagem (RODRÍGUEZ *et al.*, 2012), o que levaria a uma redução das áreas e da infraestruturas necessárias para a realização do processo.

2.4.3.2.1 Método de reator de batelada em laboratório

O método de reator em laboratório foi conduzido em uma instalação piloto de compostagem montada nas dependências do Laboratório de Resíduos Sólidos da Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, desenvolvida pelo Prof. Dr. Jorge Akutsu no ano de 2009. O esquema da montagem experimental pode ser visualizado na Figura 9.

Os parâmetros medidos, na fase gasosa, consistiram basicamente na determinação da evolução temporal do consumo de O_2 e respectiva geração de CO_2 sendo estes gases analisados e registrados pelo aparelho medidor de forma contínua ao longo do processo, aqui representado e referido como sendo um ciclo (ANDREOTOLLA *et al.*, 2005).

Figura 9: Esquema da instalação piloto de laboratório para processo de compostagem de resíduos sólidos.



Fonte: MARTINS *et al.* (2009).

Na Figura 10 observa-se a estrutura geral dos equipamentos do processo de análise experimental de compostagem de resíduos sólidos.

Figura 10: Estrutura geral do processo de análise de compostagem, formada basicamente por tambor rotativo, analisador de gases e aquisição de dados.



Os equipamentos utilizados no experimento foram um reator hermético rotativo, instalado no interior de uma caixa fechada com vidros duplos e com uma janela removível para manuseio das amostras, para minimizar as variações de temperatura durante o processo, o seu odor característico e permitir a visualização

do mesmo; um analisador de gases e um microcomputador para obtenção dos dados e controle do reator, sendo estas etapas interligadas e dependentes (SCOTON *et al.*, 2015).

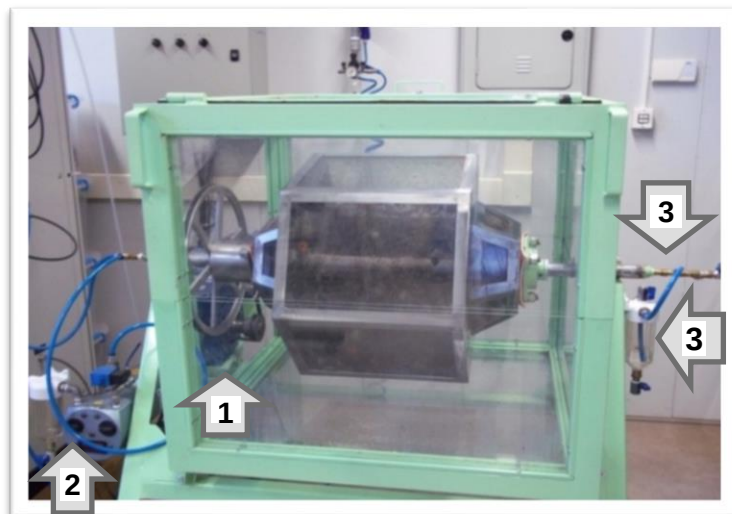
O tambor rotativo, cujo corpo principal apresenta seção hexagonal com dimensões de 35 cm nas suas diagonais e 50 cm de comprimento, perfazendo um volume interno útil de 90 litros, possui em seu eixo uma tubulação em aço inox que serve como suporte para transmissão da rotação e ao mesmo tempo como tubulação de entrada e saída dos gases. Esse eixo é assentado sobre dois mancais de suporte e sustentação e por um sistema de roldanas acoplado a uma correia acionada por um conjunto motor-redutor (MARTINS *et al.*, 2009), conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11: Tambor rotativo no interior da caixa termorreguladora.



Na Figura 12 são apresentados os equipamentos acoplados a esta instalação. Encontram-se, (1) motor responsável pela rotação do reator; (2) bomba de purga; (3) entrada de ar e respectivo filtro que abastece o reator e, entrada de ar e saída de ar para o analisador de gases (no interior do tambor). O sistema conta ainda com dois conjuntos de sopradores (bombas de ar), um destinado à alimentação do reator e outro destinado à recirculação.

Figura 12: Tambor rotativo e equipamentos acoplados.



O piloto contou também, com um sistema de coleta e análises automatizado dos gases O_2 e CO_2 , conectado à linha de recirculação. O aparelho medidor, um dispositivo modelo S710 (Figura 13), fabricado pela empresa Sick Maihak, apresenta um *display* (Figura 14) onde mostra e registra os valores de concentração desses gases em termos percentuais ($\%O_2$ e $\%CO_2$), com opção de coleta e registro de dados em intervalos de 1s a 600s (AKUTSU *et al.*, 2009). Este equipamento tem uma interface de comunicação serial que envia os dados para um computador (Figura 15), que os recebe de forma “*on line*” no formato de uma sequência de caracteres alfanuméricos (*string*). Um *software* específico para a obtenção das medições foi desenvolvido pela UNESP Bauru, que recebe os dados e separa as informações relativas aos diferentes níveis de O_2 e CO_2 (Figura 16).

Figura 13: Analisador de gases modelo S710.



Figura 14: *Display* do analisador de gases modelo S710.

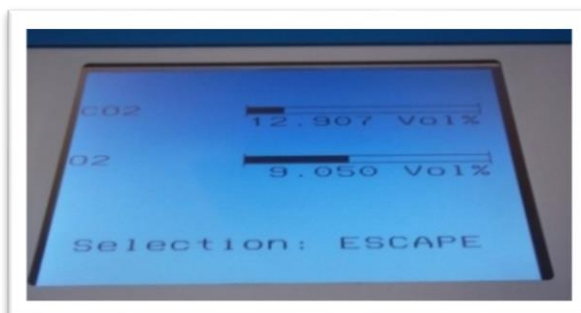


Figura 15: Aquisição de dados pelo computador.

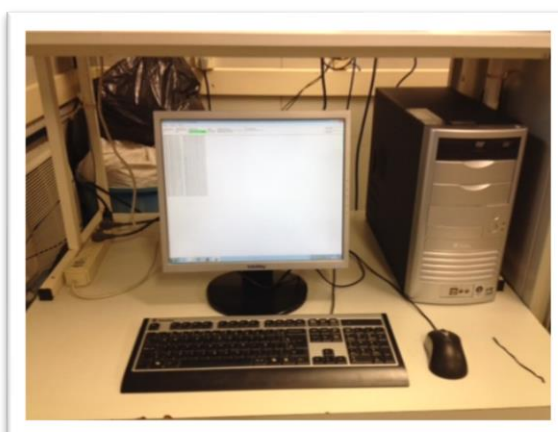
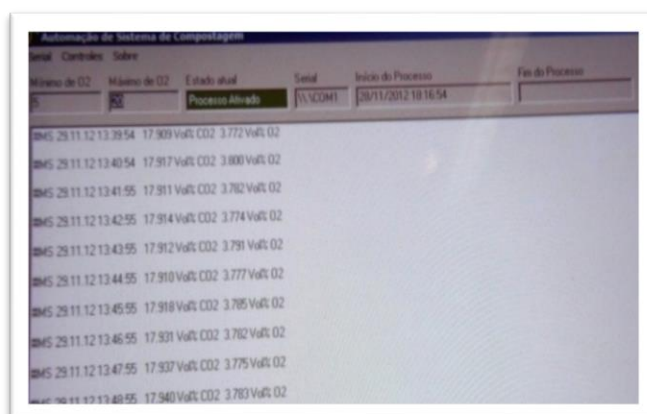


Figura 16: Tela principal do *software*, que mostra em tempo real as variações de gases do processo.



O *software* controla ainda um mecanismo de *hardware* que permite injetar uma concentração desejada e pré-estabelecida de ar no interior do reator, para o consumo das bactérias envolvidas na degradação dos resíduos. Nesta pesquisa foram trabalhados níveis de O_2 entre 5% e 20% (AKUTSU *et al.*, 2009). Analisando-se o processo de compostagem através do tempo gasto para que o consumo de O_2 , a partir do início do processo, com percentual de aproximadamente 20% do total da mistura gasosa no interior do reator, até sua redução para o valor de até 5% dessa mistura. Ao atingir um percentual inferior a 5%, o sistema automaticamente efetua a purga, ou seja, a eliminação da mistura gasosa (com alto índice de CO_2) e a introdução de ar ambiente com índice de cerca de 20% de O_2 , e assim, sucessivamente, até que haja estabilização do composto.

Na Figura 17 é apresentada a *string* de dados que é fornecida ao computador de minuto em minuto.

Figura 17: Sequência de dados do analisador de gases armazenados no computador.

#MS 29.11.12 17:03:19 5.325 Vol% CO2 16.585 Vol% O2

Onde: 1) #MS: indicador de resultados da análise do analisador de gases (S710) em operação;

2) 29.11.12: data do envio dos dados;

- 3) 17:03:19: hora do envio dos dados;
- 4) 5.325 Vol% CO₂ : medida de CO₂ em %Vol;
- 5) 16.585 Vol% O₂ : medida do O₂ em %Vol.

2.4.3.3 Sistemas de compostagem doméstica

A compostagem foi consideravelmente desenvolvida e estudada em nível industrial, sendo amplamente relatada na literatura (AMLINGER *et al.*, 2008; BLENGINI, 2008; COLÓN *et al.*, 2009; HAUG, 1993; RUGGIERI *et al.*, 2008). No entanto, em pequena escala, a compostagem também pode ser desenvolvida em casa, através de composteiras domésticas, um processo que tem sido pouco estudado a partir de um ponto de vista técnico e científico (AMLINGER *et al.*, 2008; CHANAKYA *et al.*, 2007).

São diversos os tipos de composteiras utilizadas, criadas e testadas na prática, no entanto, as pesquisas científicas são recentes e incipientes, principalmente no Brasil, sendo necessária a investigação sobre o seu funcionamento e eficiência. A Figura 18 apresenta alguns tipos de composteiras domésticas utilizadas.

Os pesquisadores Ravi Kumar *et al.* (2009) realizaram pesquisa experimental comparando três modelos de composteira doméstica, e comentam que o modelo de vermicompostagem em caixas de plástico é a melhor opção, sendo uma opção viável em nível doméstico. A vermicompostagem em residências pode ser uma alternativa quando as restrições de espaço são uma preocupação. O processo envolve a estabilização de resíduos sólidos orgânicos através do consumo por minhocas que convertem os resíduos em húmus. Sendo na verdade, o resultado da atividade combinada por microorganismos e minhocas (SINGH *et al.*, 2011), embora as minhocas sejam os principais agentes do processo (LAZCANO *et al.*, 2008).

O produto obtido no final do processo é rico em nutrientes para as plantas e é livre de organismos patogênicos (SINGH *et al.*, 2011). Várias espécies de minhocas são adequadas para o tratamento de resíduos, as espécies *Eisenia andrei*

e *Eisenia foetida* (minhoca Californiana) são as mais utilizadas (KHWAIRAKPAM ; BHARGAVA, 2009).

Como a compostagem em grande escala exige um investimento significativo em transporte, energia e instalações, a minicompostagem ou compostagem doméstica, utilizada para pequenas quantidades de resíduos, se torna uma alternativa importante em regiões que não contam com o processo de compostagem (MARTINS, 2012). Martínez-Blanco *et al.* (2010) concluem que a compostagem doméstica é uma alternativa interessante, especialmente em áreas com população de baixa densidade.

O processo apresenta muitas vantagens, como a redução na quantidade de resíduos encaminhados para as usinas de compostagem e aterros, redução do impacto ambiental causado pelo chorume produzido pela deposição do material orgânico em aterros, fortalecimento da consciência ambiental e da responsabilidade social de cada indivíduo, além de terem baixo custo operacional e alguns tipos ser modelos pequenos que ocupam pouco espaço, tornando-se ideais para casas pequenas e apartamentos, como é o caso da composteira de caixas de plástico de três andares, que também é considerada segundo alguns estudos, como o realizado por Martins (2012), como um excelente modelo e com ótimos resultados para ser utilizado em residências.

Figura 18: Exemplos de composteiras domésticas utilizadas.



Fonte: Martins (2012).

2.4.4 Aplicações do método respirométrico na avaliação do processo de compostagem através de reatores biológicos

Akutsu *et al.* (2009) comenta que o método respirométrico ou “respirometria” é um procedimento em que as medições da velocidade ou taxa de consumo de oxigênio, ou a taxa de geração de sub-produtos gasosos decorrentes da atividade respiratória de microrganismos quando as mesmas efetuam a degradação biológica de um substrato orgânico, podem ser efetuadas em meios líquidos ou gasosos e, serem utilizados dentro dos sistemas fechados ou reatores biológicos. Segundo a revisão bibliográfica realizada pode-se considerar que o método é recente e vem sendo utilizado na avaliação de processos de compostagem.

O método respirométrico, também é definido como um procedimento que mensura a velocidade, taxa de consumo de oxigênio, e taxa de geração de sub-produtos gasosos decorrentes da atividade respiratória de microrganismos (degradação biológica), no caso o gás carbônico, de um substrato orgânico (GUARDIA *et al.*, 2008; LASARIDI; STENTIFORD, 1998; RODRIGUEZ *et al.*, 2012; SCAGLIA *et al.*; 2005).

Conforme Ponsa *et al.* (2009), o grau de estabilidade desejado em um processo de compostagem é o que determina os diversos parâmetros de controle e dimensionamento do sistema, tais como a taxa de aeração e o tempo de tratamento requerido para cada tipo de resíduo orgânico. Nos processos de compostagem em que há predominância de atividades de bactérias aeróbias, as quantificações tanto da taxa de consumo do oxigênio (O_2) quanto da taxa de geração temporal do gás carbônico (CO_2), podem ser realizadas na atmosfera de um ambiente controlado, por meio de um reator (GETAHUN, *et al.*, 2012; RODRIGUEZ *et al.*, 2012).

Gea *et al.* (2004) demonstram valores e discussão de índices que vêm sendo utilizados para a avaliação e monitoramento da atividade biológica em processos de compostagem, utilizando-se de índices respirométricos. Dentre eles são analisados e citados os seguintes valores:

- Taxa de consumo de oxigênio ($T\ CO_2 = g\ O_2/kg\ MOT \cdot h$)
- Índice de respiração dinâmica ($IRD = g\ O_2/kg\ MOT \cdot h$)
- Índice de respiração estática ($IRE = g\ O_2/kg\ MOT \cdot h$)

• Quociente respiratório (QR = moles CO₂ gerado/moles de O₂ consumido)

Onde: MOT representa a matéria orgânica total em kg.

A TCO₂, para Gea *et al.* (2004), pode ser denominada também na literatura como sendo o índice de respiração dinâmica (IRD), quando se trata de avaliar processos de compostagem em sistemas com aeração sucessiva e dotados de mistura em reatores do tipo tambores rotativos.

Adani *et al.* (2004) expõem o estudo do índice IRD (Índice de Respiração Dinâmica) como referencial para verificar o grau de estabilidade biológica dos resíduos sólidos obtida em sistemas de compostagem. Esse grau de estabilidade determina o nível em que uma matéria orgânica foi decomposta biologicamente, sendo que esse nível identifica o ponto alcançado no processo de biodegradação.

Dessa forma, o valor de um composto pode ser diretamente associado ao grau de estabilidade alcançado, já que evitará, quando disposto no solo, danos como potencial de geração residual de odores, gases, geração de calor e alteração do pH, além de efeito de fitotoxicidade às plantas.

Adani *et al.* (2004) citam ainda que, para objetivo de acompanhamento respirométrico de processos de compostagem, o método que se utiliza da análise da taxa de consumo de O₂ (TCO₂), tem sido preferida pelos pesquisadores da área.

Andreottola *et al.* (2005) descrevem novos métodos que foram desenvolvidos no Laboratório di Ingegneria Sanitaria-Ambientale (LISA) da Università di Trento, na Itália, que aborda os métodos respirométricos voltados ao controle biológico em geral, com técnicas desenvolvidas para utilização em tratamentos de águas residuárias, principalmente no controle de processos de lodos ativados e mais recentemente para aplicação em sistemas de tratamento de fitodepuração.

Kopčić *et al.* (2014) apresentam pesquisa de co-compostagem, utilizando em escala de laboratório um reator isolado termicamente e automatizado, com aeração forçada através de compressor de ar, e aquisição de dados e monitoramento do processo via computador. Investigaram a viabilidade da compostagem da mistura de maçã e de resíduos sólidos de tabaco, a partir da análise da taxa de consumo de oxigênio (TCO₂).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Quanto a sua natureza, o método utilizado foi a pesquisa aplicada experimental, e para a análise de dados, a pesquisa quantitativa. Com comparação de experimentos, entre o método de compostagem em laboratório (reator biológico) com os métodos de compostagem em leira e em composteira doméstica, para analisar o melhor método para a destinação dos resíduos sólidos orgânicos, em relação aos parâmetros: composição dos resíduos utilizados, umidade, teor de oxigênio, temperatura, relação carbono/nitrogênio (C/N), tamanho de partícula dos resíduos, pH e, principalmente, a qualidade do composto produzido.

3.1 Resíduos utilizados para condução dos experimentos

Na escolha dos resíduos, buscou-se trabalhar com resíduos orgânicos gerados em grande quantidade no Brasil. E que ao mesmo tempo tivessem participado dos experimentos iniciais de testes do projeto piloto em laboratório, buscando assim uma análise comparativa de dados obtidos.

Os resíduos orgânicos utilizados na condução dos experimentos foram obtidos através da coleta de resíduos de alimentos do restaurante presente na Faculdade de Engenharia, Campus da UNESP – Bauru, sendo incorporados aos mesmos, outros materiais estruturantes, o farelo de bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de podas de grama, borra de pó de café e serragem.

Nas Figuras 19 a 23 são apresentados os resíduos utilizados nos experimentos, os resíduos de alimentos picados, coletados no restaurante presente na Faculdade, constituído de talos, folhas, cascas e bagaços de frutas, legumes e verduras, além de cascas de ovos; O farelo seco de bagaço de cana-de-açúcar, resíduo de usinas de açúcar e álcool, coletado na própria universidade, por ser também resíduo das pesquisas de iniciação científica dos cursos de engenharia civil e arquitetura da UNESP; Borra de pó de café seca ao sol; Resíduos triturados de podas de grama, coletados no campus e na prefeitura da cidade; E serragem, fornecida pela empresa fabricante das composteiras utilizadas nesta pesquisa, e por uma empresa de materiais de construção do município de Bauru.

Foram colocados em cada leira e composteira, 7,5 kg de resíduos de alimentos, 5 kg de farelo de bagaço de cana-de-açúcar, 4 kg de borra de pó de café, 2,5 kg de resíduos de poda de grama, e 3 kg de serragem. Com um total de 22 kg de resíduos, em cada sistema de compostagem (duas leiras e duas composteiras).

As quantidades de cada resíduo utilizado foram estimadas com base na relação carbono/nitrogênio (C/N) de cada resíduo, encontrada na literatura, conforme Kiehl (1985) e Embrapa (2010). Procurou-se manter o tamanho das partículas dos resíduos (granulometria) aproximadamente, entre 10 e 100 mm.

Figura 19: Resíduos de Alimentos.



Figura 20: Farelo de bagaço de cana-de-açúcar.



Figura 21: Borra de pó de café.



Figura 22: Resíduos de grama triturados.



Figura 23: Serragem.



3.2 Método em leira

Os pilotos das leiras de compostagem foram construídos em uma área de jardim com cobertura, de uma escola de ensino infantil (Figura 24). As duas leiras são do tipo revolvida, com revolvimento manual, construídas em chão de terra e em camadas, no formato de monte, colocando-se um resíduo sobre o outro, alternando secos e úmidos, para a manutenção das condições ideais de aeração e temperatura durante o processo.

O chão de terra que recebeu as leiras foi molhado e afofado, para posteriormente, receber uma camada de grama seca, e em seguida os resíduos de alimentos de restaurante (restaurante universitário da FEB/UNESP), farelo de bagaço de cana-de-açúcar, borra de pó de café, resíduos de poda de grama e serragem. Cada camada de resíduos colocada foi irrigada com cerca de um litro de água, para manter a umidade adequada nas leiras.

As dimensões das leiras revolvidas variam de acordo com a quantidade de resíduos a serem compostados, não tendo leiras menores que 1,0 m³ (1,0 m de altura x 1,0 m de largura x 1,0 m de comprimento), que dificultam a manutenção das condições ideais da compostagem (OLIVEIRA *et al.*, 2005). No entanto, as duas leiras construídas, possuíam dimensões de 1,0 m de largura x 1,0 m de comprimento x 80 cm de altura, em função da quantidade disponível de resíduos para o experimento (Figura 25).

Figura 24: Área de jardim de escola de ensino fundamental, onde foi realizada a compostagem.



Figura 25: Leira 1 (esquerda) e leira 2 (direita).



3.3 Método em composteira doméstica

A composteira doméstica escolhida para a pesquisa foi a composteira de caixas plásticas de três andares (Figura 26), que realiza o processo de compostagem com a utilização de minhocas (vermicompostagem), fornecida pela empresa Morada da Floresta. O modelo escolhido possui três recipientes empilhados e uma tampa de plástico. Além de uma torneira de bebedouro, também de plástico, para a retirada do chorume gerado durante o processo. Estrutura semelhante às composteiras utilizadas por Lheó *et al.* (2013) e Martins (2012).

A tampa possui alguns furos e os dois primeiros recipientes de cima para baixo (1 e 2) também contêm furos no fundo, para a passagem do chorume através

das caixas, até chegar ao final da última caixa, onde será armazenado e retirado através da torneira. Na caixa 1, são colocados terra e as minhocas, e posteriormente adicionados os resíduos, cobertos com uma camada fina de terra ou serragem. Quando a caixa 1 estiver cheia, ela será passada para baixo, ficando no lugar da caixa 2, que vai para cima, onde é repetido o procedimento, só que sem a adição de minhocas.

As minhocas utilizadas são aproximadamente trezentas minhocas Californianas ou Vermelhas (*Eisenia foetida*), também fornecidas pela empresa Morada da Floresta (Figura 27). As dimensões das duas composteiras utilizadas nesta pesquisa são 62 cm de comprimento, 39 cm de largura e 80 cm de altura, com caixas de 60 litros, e capacidade de 2 litros de resíduos por dia, sendo indicadas para quatro a cinco pessoas.

Figura 26: Composteiras domésticas de caixas de três andares, que realiza o processo de compostagem com a utilização de minhocas (vermicompostagem).



Figura 27: Minhocas Californianas ou Vermelhas (*Eisenia foetida*), fornecidas pela empresa Morada da Floresta.



Fonte: Morada da Floresta (2014).

Os resíduos foram colocados nas duas composteiras, na mesma quantidade, a cada dois dias, três vezes na semana. Foram colocados por dia 250g de cada resíduo (cinco tipos de resíduos), num total de 1,250kg de resíduos/dia, e 3,750 kg/semana, chegando ao total de 11 kg em cada caixa. No total foram colocados 22 kg de resíduos em cada composteira, durante um período de seis semanas (42 dias).

Cada composteira tem capacidade para 60 kg de resíduos, sendo 30kg em cada caixa (duas caixas), e suporta até no máximo 2 kg de resíduos/dia, para não sobrecarregar a atividade das minhocas.

3.4 Coleta de dados

Os dados foram coletados e analisados da forma descrita a seguir:

3.4.1 Análise dos resíduos utilizados e do composto final

No início dos experimentos, cada resíduo utilizado foi levado para a análise de sua composição, em laboratório. Uma amostra de cada resíduo foi analisada pelo Laboratório de Saneamento da USP São Carlos e pelo Laboratório de Saneamento da UNESP Bauru. E ao final do processo, uma amostra de composto de cada sistema também foi analisada.

A avaliação tanto dos resíduos utilizados, quanto dos produtos finais, foi realizada com a análise dos seguintes parâmetros: pH, teor de umidade, relação C/N (carbono/nitrogênio), macronutrientes Na, Ca, Mg, micronutrientes Cu, Fe, Mn, Zn e NPK.

Os resultados das análises do composto final produzido foram comparados com as especificações do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento para fertilizantes orgânicos simples, contidas na Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009, para aplicação no solo. O Ministério da Agricultura fiscaliza a produção e o comércio de fertilizantes, corretivos e inoculantes, conforme disposto na Lei nº 6.894 de 16 de dezembro de 1980, regulamentada pelo Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004.

3.4.2 Tamanho de partícula dos resíduos

Para acelerar e tornar adequado o processo de compostagem procurou-se manter o tamanho das partículas dos resíduos entre 10-100 mm. Sendo que nos sistemas das leiras o tamanho das partículas dos resíduos de alimentos foi maior, em relação ao das composteiras e do reator, devido às dimensões das pilhas, sendo necessário um volume maior de resíduos.

Os resíduos de alimentos coletados do restaurante da Faculdade foram picados com auxílio de faca de cozinha. Os resíduos de bagaço de cana-de-açúcar foram utilizados na forma de farelo seco, forma que foi disponibilizado pelos alunos de iniciação científica da Universidade. A borra de pó de café coletada foi seca ao sol, durante cinco dias. E os resíduos de poda de grama foram dispostos em local coberto e deixados para secar por cinco dias, posteriormente, passaram por uma máquina de trituração (Figura 28). A serragem foi utilizada na forma coletada.

Figura 28: Triturador dos resíduos de poda de grama.



3.4.3 Teor de oxigênio

O teor de oxigênio, ou seja, a quantidade de oxigênio consumida pelos microrganismos durante o processo de compostagem foi coletado apenas no método em laboratório (reator). Através do sistema de coleta e análise automatizado do gás O_2 do projeto piloto descrito anteriormente. Os valores de concentração de O_2 são registrados em termos percentuais ($\%O_2$) ao longo do processo. Estes valores percentuais foram revertidos em unidades de medida de massa (gramas) e de volume (litros), em cada um dos ciclos de purga que ocorreram durante o período de decomposição dos resíduos orgânicos.

Esta conversão de unidades é importante, pois permite os cálculos e o dimensionamento de todo o processo de compostagem, ou seja, a quantidade e o espaço ocupado pelos gases que serão necessários para que determinada massa de resíduos seja compostada, e o reator a ser utilizado, permitindo também, o dimensionamento de reatores em grandes escalas.

3.4.4 Temperatura

A temperatura ao longo dos processos foi coletada com o auxílio de Termômetro Digital Tipo Espeto, de fabricação Incoterm Soluções em Medição

(Figura 29). A frequência das coletas foi de três vezes na semana, sempre no período da manhã, às 9 horas nas composteiras e às 10 horas nas leiras.

A coleta foi realizada em três pontos das leiras (topo, centro e base), com permanência do termômetro de um minuto em cada ponto. Nas composteiras, a coleta foi em dois pontos. Foram escolhidos dois pontos de coleta com o intuito de verificar se há diferença de temperatura dentro das composteiras, que são recipientes fechados, mas que possuem aberturas para a entrada de ar ambiente.

Ao final de cada coleta foi calculada a temperatura média do dia, de cada um dos sistemas. E posteriormente, ao final de cada semana, foi calculada a temperatura média de cada ponto, e a média da semana, de cada um dos sistemas.

Figura 29: Termômetro Digital Tipo Espeto.



3.4.5 Umidade

A umidade foi calculada a partir da coleta de amostras da massa em compostagem, de cada um dos sistemas. As amostras foram coletadas em semanas alternadas, sempre no período da manhã, e antes do revolvimento das leiras. Nas leiras, foram retiradas amostras do centro, e nas composteiras, amostras da caixa 2 (que está na posição 2 ao final do processo), que no início do processo estava em cima (posição 1), e que depois foi colocada para baixo, quando ficou cheia, trocando de lugar com a caixa 1, que estava em baixo (posição 2) e vazia. Escolheu-se retirar amostras da caixa 2, pois esta permaneceu mais tempo cheia de resíduos sendo

compostados. O reator, por ser um ambiente fechado, mantém a massa homogênea, em função disso, não foi estabelecido um ponto de coleta.

Estas amostras foram pesadas (peso úmido), e posteriormente, colocadas em estufa, à 100°C, durante 24 horas, e novamente pesadas (peso seco). Assim, foram obtidas a massa úmida e a massa seca das amostras, ou seja, a quantidade de água contida na mistura (massa de água). Para o cálculo da porcentagem de água, isto é, do teor de umidade da massa em compostagem, foi utilizada as seguintes equações:

$$\text{Peso de água (g)} = \text{Peso Úmido} - \text{Peso Seco} \quad (1)$$

$$\text{Umidade (\%)} = \text{Peso de água} / \text{Peso Úmido} \times 100 \quad (2)$$

As leiras foram irrigadas três vezes na semana, com uma quantidade de água de 2 e 4 litros por dia, dependendo da condição física das leiras (úmida ou seca) devido ao tempo, e dependendo também, do resultado da análise de teor de umidade realizada em semanas alternadas, em laboratório. Nos dias chuvosos a quantidade de água foi menor (2L), uma vez que mesmo com a cobertura uma parte das leiras era alcançada pela chuva, e nos dias de tempo seco, com muito vento ou sol nas leiras, a quantidade de água era aumentada (4L), o mesmo ocorreu para os dias da semana em que foi constatada a alta umidade da massa em compostagem.

As composteiras, também foram molhadas três vezes por semana, com uma quantidade de 200 ml de água/dia. Não recebendo irrigação nos dias da semana em que foi constatada, mediante análise laboratorial, a alta umidade da massa.

3.4.6 Potencial Hidrogeniônico (pH) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Os parâmetros pH e DBO foram medidos a partir de amostras da massa em compostagem, de cada um dos sistemas, no Laboratório de Saneamento do DAE (Departamento de Água e Esgoto de Bauru) na Faculdade de Engenharia/FEB Unesp.

As amostras foram coletadas em semanas alternadas, sempre no período da manhã, e antes do revolvimento das leiras. Nas leiras, foram retiradas amostras do centro, e nas composteiras, amostras da caixa 2 (que está na posição 2 ao final do processo). Escolheu-se retirar amostras da caixa 2, pois esta permaneceu mais tempo cheia de resíduos sendo compostados.

Para a determinação dos dados, as amostras foram diluídas em 200 ml de água ultrapura (água deionizada), permanecendo durante um dia nesta solução. No dia seguinte a amostra foi filtrada (Figura 31) utilizando-se um pano do tipo de cozinha (Figura 30). A coleta do pH foi feita a partir deste filtrado, com o auxílio de aparelho medidor de pH (Figura 32).

Figura 30: Filtragem das amostras.



Figura 31: Amostras filtradas.

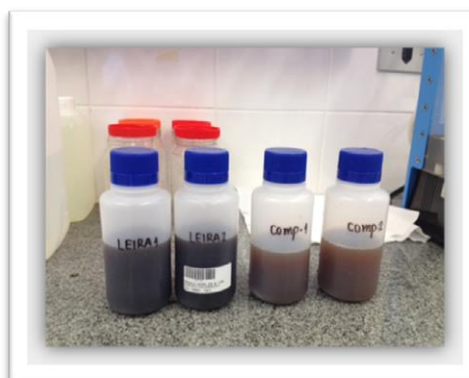


Figura 32: Aparelho medidor de pH.



A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) fornece a quantidade de oxigênio necessária para decompor certa quantidade de matéria orgânica. Assim, com o valor da DBO tem-se a vazão de gás oxigênio necessária para se decompor uma matéria orgânica (SCOTON *et al.*, 2015).

A DBO é unidade de medida que calcula a quantidade do oxigênio consumido pela atividade bacteriana sendo proporcional ao tempo, ou seja, quanto maior o tempo mais matéria orgânica biodegradável é decomposta pela atividade aeróbica das bactérias. Os valores de DBO na literatura são encontrados representados em sua maioria na unidade de mg/l, por serem medidos em meios líquidos.

Para a análise da DBO a amostra filtrada foi diluída 20 vezes. Foram colocados 5 ml de amostra, com auxílio de pipeta, em um balão de 100 ml, e o restante do volume completado com água ultrapura. Em seguida, 95 ml desta solução foram colocados em vidros, que iam para o analisador de DBO, ou seja, a Estufa com Fotoperíodo e Termoperíodo (a 20°C), permanecendo neste aparelho por 5 dias, tempo necessário para a completa captação dos dados.

O aparelho mede valores de DBO até 700 mg/l, sendo necessária a diluição das amostras, uma vez que no teste das análises foram encontrados valores muito altos de DBO antes da diluição, não sendo captados pelo analisador.

A Figura 33 apresenta os balões e os vidros utilizados durante as análises de pH e DBO. E na Figura 34 visualiza-se o equipamento utilizado para captação dos dados de DBO.

Figura 33: Frascos utilizados durante as análises de pH e DBO. Os balões (esquerda) e os vidros (direita).



Figura 34: Aparelho medidor de DBO (Estufa com Fotoperíodo e Termoperíodo).



3.4.7 Revolvimento das leiras

Para manter as condições de oxigenação e temperatura ideais para o processo de compostagem, a partir da segunda semana as leiras foram revolvidas três vezes na semana, pulando-se os finais de semana. A frequência deste revolvimento foi reduzida para uma vez na semana, a partir da 14^a semana do processo (fase em que ocorreu diminuição da temperatura). O revolvimento foi realizado manualmente, com auxílio de rastelo de jardim (Figura 35), sempre no período da manhã.

Figura 35: Revolvimento manual das leiras com auxílio de rastelo.



3.4.8 Formação de líquido nas composteiras

Com a decomposição da matéria orgânica (compostagem), pelas minhocas e microrganismos presentes nas composteiras, pode ser produzido, se houver excesso de umidade, além do composto sólido, um composto líquido, normalmente, de cor escura, resultante da decomposição biológica da matéria orgânica presente nos resíduos. Este composto é um excelente adubo, rico em nutrientes (MORADA DA FLORESTA, 2014).

Nas composteiras utilizadas há uma torneira para a retirada do líquido produzido. Estas torneiras foram verificadas uma vez por semana, sempre ao final de cada semana, para a verificação da produção ou não deste líquido durante o processo. Uma vez constatada a produção do composto líquido, este seria medido (volume) e encaminhado para análise laboratorial.

3.5 Forma de análise dos dados

As análises foram feitas a partir da coleta de dados e avaliação das seguintes variáveis: composição dos resíduos utilizados nos experimentos, umidade da massa em compostagem, temperatura, relação C/N, tamanho de partícula, pH, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e qualidade do composto final.

Os dados obtidos foram plotados através do gerador de Gráficos do Excel.

Os resultados obtidos, o tempo necessário para a estabilização do composto, pH, teor de umidade, e temperatura foram apresentados de forma gráfica, analisando sua variação ao longo do processo de compostagem nos experimentos (leira e composteira doméstica).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 9 e 10 observam-se os resultados obtidos da análise laboratorial da composição dos resíduos utilizados no processo de compostagem.

Predrosa *et al.* (2013) comentam que a decomposição de qualquer matéria orgânica está diretamente relacionada com as suas características físicas, químicas e biológicas. Neste sentido, é importante a caracterização dos resíduos, uma vez que no processo de co-compostagem é produzido um composto a partir de uma mistura de diversos resíduos diferentes, sendo necessário a determinação da mistura ideal, ou seja, a quantidade de cada um dos resíduos nos sistemas. Assim, torna-se essencial para a produção de um composto de qualidade, que cada resíduo utilizado tenha as suas principais propriedades caracterizadas.

Tabela 9: Composição dos resíduos do processo de compostagem.

Resíduos	Umidade (%)	pH	Relação C/N	Sólidos Totais (g)	Sólidos Totais Fixos (g)	Sólidos Totais Voláteis (g)
Alimentos	88	5,14	17,34	5,92	2,18	3,74
Poda de Grama	11	7,71	35,52	8,63	1,54	7,09
Borra de Pó de Café	29	4,67	39,84	21,39	0,51	20,88
Farelo de Bagaço de Cana-de-Açúcar	2,9	5,42	50,8	9,71	1,02	8,69
Serragem	12	4,17	106,5	26,6	0,25	26,35

Tabela 10: Composição dos resíduos utilizados na compostagem (macro e micro nutrientes).

Resíduos	Na	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	N	P	K
Alimentos	65	5240	245	0,659	2,133	6,66	2,403	<0,05	0	4100
Poda de Grama	960	9620	3234	8	1978	123,6	70,6	<0,05	0	10800
Borra de Pó de Café	350	1860	1642	32,6	78,6	34,5	17,9	<0,05	0	3950
Farelo de Bagaço de Cana-de-Açúcar	130	3500	762	8,8	1182	45,6	57	<0,05	0	710
Serragem	220	613	490	0,3	42,1	45,3	13,4	<0,05	0	610

Os resíduos de alimentos apresentaram o maior teor de umidade (88%), assim como era esperado, e também descrito na literatura, que apresentou o teor de umidade de restos de alimentos acima de 80%. O que tornou necessário a sua mistura com outros resíduos de menor umidade, como foi realizado nesta pesquisa (INACIO, 2010).

Quanto ao pH, predominaram os valores ácidos, da serragem (4,17), da borra de pó de café (4,67), resíduos de alimentos (5,14), e do farelo de bagaço de cana-de-açúcar (5,42). Somente o resíduo de poda de grama apresentou pH alcalino (7,71).

As relações C/N encontradas nos resíduos de cana-de-açúcar e de borra de café foram superiores aos valores descritos na literatura, enquanto que no resíduo de serragem o valor foi inferior, porém, igualmente alto. Os resíduos de poda de grama e de alimentos apresentaram relação C/N semelhantes às descritas na literatura (INACIO, 2010; KIEHL, 1985).

Os valores de N e P apresentaram-se muito baixos e no caso do fósforo, igual a zero. Estes nutrientes, conforme Lasaridi *et al.* (1998) e Kiehl (2004) são importantes para a qualidade do composto orgânico produzido. Segundo os autores, as concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) são importantes para o valor do composto, à medida que representam também uma forma de se avaliar a sua qualidade e calcular seu valor de mercado comparando-se aos adubos químicos.

4.1 Compostos produzidos

Nas Tabelas 11 e 12 são apresentados os resultados obtidos da análise laboratorial da composição do produto final (composto) dos quatro experimentos realizados.

Tabela 11: Composição dos produtos finais (composto) do processo de compostagem.

Composto	Umidade (%)	pH	Relação C/N	Sólidos Totais (g)	Sólidos Totais Fixos (g)	Sólidos Totais Voláteis (g)
Leira 1	13	6,73	64,14	17,35	5,34	12,01
Leira 2	20	6,26	34,93	15,34	4,66	10,68
Composteira 1	75	6,16	62,75	5,08	1,42	3,66
Composteira 2	76	6,81	64,67	5,05	1,48	3,57

Tabela 12: Macro e micro nutrientes dos compostos produzidos no processo de compostagem.

Resíduos	Na	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	N	P	K
Leira 1	610	15900	1721	11,1	2469	92,4	64,8	<0,05	0	2890
Leira 2	610	3510	1646	12,2	3283	81,3	64,4	<0,05	0	2670
Composteira 1	210	2690	1137	<LD	820	43,5	27,7	<0,05	0	2670
Composteira 2	210	2400	1069	<LD	814	44	25,7	<0,05	0	2960

LD – limite da análise.

Os compostos apresentaram diferença significativa de valores de teor de umidade. Os compostos resultantes das composteiras domésticas apresentaram maior teor de umidade em relação às leiras, assim como descrito por Barrena *et al.* (2014). Permanecendo também, acima do valor máximo de umidade para o seu uso na agricultura, que é de 40%, conforme norma específica (Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009, para aplicação no solo).

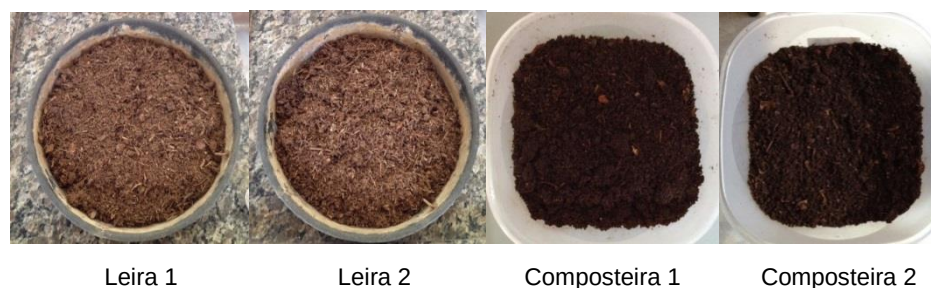
O pH permaneceu ácido, porém, acima de 6, mantendo-se dentro da norma e da faixa ideal, que situa-se entre 6,5 e 7,5 conforme Sundberg *et al.* (2004) e Yu e Huang (2009).

As relações C/N estiveram muito acima das descritas na literatura, e também das especificações da lei, que devem ser menores que 20.

Quanto aos valores de N e P apresentaram-se muito baixos e no caso do fósforo, igual a zero, somente os valores de K se elevaram, o que demonstra a baixa qualidade e valor de mercado dos compostos produzidos.

Na Figura 36 são apresentados os compostos produzidos nos quatro experimentos acompanhados nesta pesquisa.

Figura 36: Compostos produzidos em cada um dos sistemas de compostagem.



4.2 Sistemas de leiras

Na Figura 37 observa-se o resultado físico obtido na compostagem das leiras 1 e 2, mostrando a transformação dos resíduos da 1ª à 16ª semana de experimento (110 dias). Comparando-se este tempo de processo de compostagem, com as pesquisas encontradas na literatura, está dentro da faixa de tempo descrita, que é de até 180 dias (LÓPEZ *et al.*, 2014; NOVAES *et al.*, 2013; OLIVEIRA, 2005).

Nota-se a mudança física, na cor, que escureceu, e no volume de resíduos das pilhas, que foi reduzido. O experimento iniciou-se com 22 kg de resíduos em cada uma das leiras, chegando ao final com 8, 265 kg na leira 1, e 8, 470 kg na leira 2.

A quantidade de amostras retiradas de cada leira, em semanas alternadas, para as análises laboratoriais foram em média 40 g para as análises de DBO e pH, e 24g para o cálculo de teor de umidade. Como foram realizadas 8 análises, no total retirou-se 512g de amostras.

Figura 37: Resultado físico dos sistemas de leiras, da 1ª à 16ª semana de experimento.



Observa-se que a máxima temperatura atingida pela leira 1 foi 32.3°C, e da leira 2, 34.3°C, que ocorreu na 2ª semana, demonstrando que o processo ocorreu em região mesofílica (25°C a 43°C), nas duas leiras. Não alcançando a faixa de temperatura ideal para a compostagem que é de 40-65°C. As temperaturas acima de 55°C (fase termófila) são necessárias para a eliminação dos microrganismos patogênicos.

Normalmente, a aeração nas leiras é mais eficiente do que nas composteiras domésticas, o que resulta na obtenção de temperaturas termófilas, que são sustentadas ao longo do processo (BARRENA *et al.*, 2014), o que não ocorreu neste experimento.

O fato da compostagem nas leiras não ter alcançado a fase termófila, poderia estar associado às dimensões das leiras, que foram menores do que o limite mínimo de 1,0 m³ (1,0 m de altura x 1,0 m de largura x 1,0 m de comprimento), que dificultam a manutenção das condições ideais da compostagem (OLIVEIRA *et al.*, 2005), causando o desequilíbrio dos sistemas. As dimensões das leiras foram de 1,0 m de largura x 1,0 m de comprimento x 80 cm de altura, em função da quantidade disponível de resíduos para o experimento. No entanto, alguns experimentos, como os realizados por Pedrosa *et al.* (2013) e Novaes *et al.* (2013), também estavam fora das dimensões limite, demonstraram boa evolução do processo de compostagem, alcançando altas temperaturas (fase termófila).

O não alcance das altas temperaturas, também pode estar associado a alguns fatores observados nesta pesquisa, como, o maior volume de resíduos secos

em relação aos resíduos mais úmidos (pesam mais), o que pode ter ocasionado falta de umidade durante a compostagem; às condições ambientais do local onde foram construídas as leiras (muito sol e vento), contribuindo para as alterações do processo; ao fato de alguns resíduos, como a serragem e o bagaço de cana-de-açúcar serem mais difíceis de se decompor, aumentando assim o tempo do processo, e também à alta relação C/N do resíduo de serragem (106,5), que pode ter contribuído para a falta de nitrogênio na mistura.

Herbets *et al.* (2005) comentaram que entre os principais fatores que interferem na temperatura em uma leira de compostagem estão: as características do material a ser compostado, o tipo de sistema utilizado, a disponibilidade de nutrientes (C/N), e a configuração geométrica da pilha.

Nota-se, que até a 7ª semana as temperaturas nas leiras se mantiveram mais altas do que a temperatura do ambiente, e posteriormente, começaram a se aproximar da temperatura ambiente, e ficaram mais baixas a partir da 12ª semana de processo (3º mês), demonstrando que houve elevação, estabilização e queda das temperaturas nas leiras, assim como ocorre no processo de compostagem.

Na compostagem, o processo se inicia com a gradativa elevação da temperatura nos primeiros dias (fase mesófila), seguida por uma rápida e ativa elevação, onde são alcançadas as temperaturas mais altas (fase termófila), que são mantidas ao longo do processo. Se aproximando do término da compostagem, as temperaturas voltam a diminuir gradativamente, retornando a fase mesófila, se estabilizando, e posteriormente, tornando-se mais baixas do que a temperatura ambiente (KIEHL, 2004).

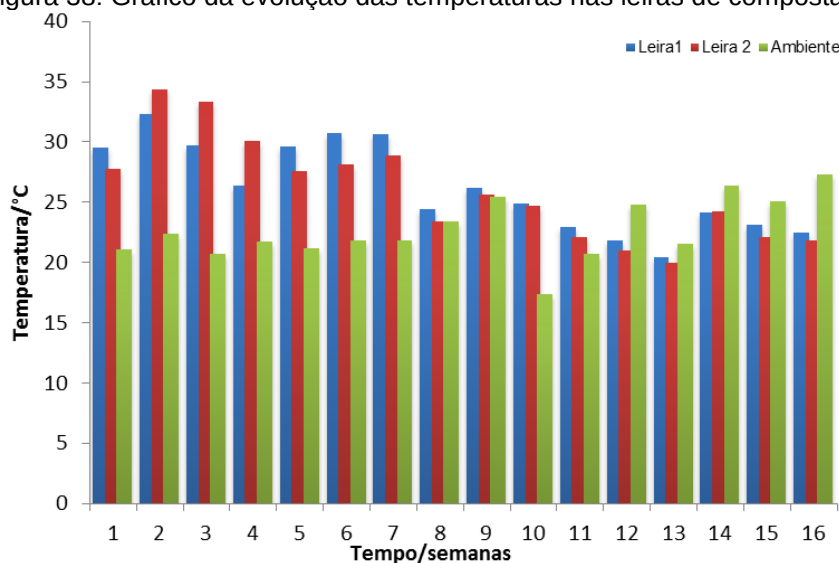
Considerou-se como encerrado o processo, quando as leiras começaram a atingir temperaturas abaixo da temperatura ambiente, mantendo-se assim ao longo do mês, não subindo novamente, mesmo com o revolvimento constante da massa.

Tabela 13: Evolução das temperaturas médias ao longo do processo, expressa em °C.

Semana	Leira 1	Leira 2	Ambiente
1 ^a	29.53	27.8	21.1
2 ^a	32.3	34.3	22.4
3 ^a	29.7	33.3	20.7
4 ^a	26.4	30.1	21.7
5 ^a	29.6	27.6	21.2
6 ^a	30.7	28.1	21.8
7 ^a	30.6	28.9	21.8
8 ^a	24.4	23.4	23.4
9 ^a	26.2	25.6	25.4
10 ^a	24.9	24.7	17.4
11 ^a	22.9	22.1	20.7
12 ^a	21.8	21	24.8
13 ^a	20.4	20	21.5
14 ^a	24.1	24.2	26.4
15 ^a	23.1	22.1	25.1
16 ^a	22.5	21.8	27.3

No gráfico da Figura 38 é apresentada a evolução das temperaturas coletadas ao longo da 1^a à 16^a semanas do processo de compostagem nas leiras. São apresentadas as médias semanais de cada leira, e as médias da temperatura ambiente.

Figura 38: Gráfico da evolução das temperaturas nas leiras de compostagem.



Na Tabela 14 são apresentadas as temperaturas coletadas em três pontos das leiras (topo, centro e base), uma vez que as leiras estão expostas às interferências ambientais, como sol, chuva e vento, podendo apresentar variações de temperatura em diferentes pontos. Observa-se que as temperaturas coletadas no centro das leiras são predominantemente mais altas do que as dos outros pontos.

Tabela 14: Evolução das temperaturas ao longo do processo de compostagem, nos três pontos de coleta das leiras.

TEMPERATURAS AO LONGO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM (°C)						
Semana	Leira 1			Leira 2		
	Topo	Centro	Base	Topo	Centro	Base
1 ^a	30.6	31.1	27.3	27.1	29.4	27
2 ^a	30.7	37.1	29.3	33.9	38.6	30.6
3 ^a	27.5	34.2	27.4	32.8	37.9	29.4
4 ^a	24.8	28.9	26.8	29.3	32.9	29.2
5 ^a	28	31.4	26.3	26.6	30	26.8
6 ^a	29.7	33.1	29.3	26	29.3	29
7 ^a	29.9	32.5	29.5	27.6	29.9	29.2
8 ^a	24.1	24.9	24.4	23.1	23.6	23.7
9 ^a	26.1	26.6	26.2	25.3	25.9	25.7
10 ^a	25.7	26.3	26	25	25.9	25.6
11 ^a	22.6	23.3	23	21.8	22.2	22.5
12 ^a	21.3	22.1	21.9	20.7	21.2	21.2
13 ^a	20.2	20.6	20.5	19.8	20.1	20.3
14 ^a	24.1	24.3	23.8	24.4	24.7	23.8
15 ^a	23.2	23.6	22.4	21.9	22.4	22.1
16 ^a	22.4	23	22.3	21.4	21.9	22.1

Na Tabela 15 são apresentados os valores de teor de umidade das amostras em compostagem. Nota-se que a umidade das massas na primeira semana de processo estava dentro do limite (40%), decaindo nas semanas seguintes, e se elevando, nas duas leiras, a partir da 5^a semana, permanecendo próxima dos limites até a 15^a semana. As médias também permaneceram próximas a faixa ideal (50-60%).

Se o teor de umidade de uma mistura é inferior a 40%, a atividade biológica é inibida, bem como a velocidade de biodegradação (FERNANDES; SILVA, 1999).

Tabela 15: Valores de teor de umidade da massa de resíduos ao longo do processo.

Teor de Umidade (%)			Irrigação (litros)	Umidade relativa do ar/mês (%)
Semanas	Leira 1	Leira 2		
1 ^a	40	40	44	77,8
3 ^a	25	20		
5 ^a	60	50	36	81,7
7 ^a	67	60		
9 ^a	50	67	48	73,7
11 ^a	60	75		
13 ^a	55	56	34	74,6
15 ^a	42	57		
Média	49,8	53,1		

Fonte: Estação Meteorológica Automática IPMet – Bauru – SP.

Os valores de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) ao longo do processo são apresentados na Tabela 16. Observa-se que os valores de oxigênio necessários para decompor a matéria orgânica, iniciaram-se altos nas duas leiras, e foram diminuindo ao longo do processo. O que indica a evolução da compostagem, já que a demanda de oxigênio para degradar os resíduos diminuiu ao longo do tempo. Ao final do processo, pode-se observar a diminuição dos valores de DBO nas duas leiras (leira1: de 3000 mg/L para 480 mg/L; leira 2: de 3120 mg/L para 520 mg/L).

Tabela 16: Valores de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) ao longo do processo de compostagem, expressos em mg/L.

Valores de DBO ao longo do processo de compostagem (mg/L)			
Data	Semana	Leira 1	Leira 2
		DBO	DBO
16/04/2015	1 ^a	3000	3120
27/04/2015	3 ^a	2800	3000
11/05/2015	5 ^a	2480	2680
25/05/2015	7 ^a	900	920
08/06/2015	9 ^a	880	720
22/06/2015	11 ^a	880	600
06/07/2015	13 ^a	800	520
20/07/2015	15 ^a	480	520

Os valores de pH das massas em compostagem são apresentados na Tabela 17. O pH durante a 1^a semana da compostagem estava abaixo de 5,0 (ácido), mas se elevou gradativamente, assim como descrito na literatura, passando

pelo pH 7,0 (neutro). Apresentando valores na faixa ideal, que se situa entre 6,5 e 7,5 (SUNDBERG *et al.*, 2004; YU; HUANG, 2009).

Alcançou valores próximos a 8,0 (alcalino) com o desenvolvimento do processo, que são valores normais para a compostagem (MANIOS, 2004), porém, sem alcançar valores acima deste.

Normalmente, o pH se mantém alcalino (7,5-9,0), durante a fase termófila. A compostagem nas leiras não atingiu a fase termófila, permanecendo apenas na fase mesófila (inicial), o que explica o pH não ter atingido valores acima de 8,0.

Tabela 17: Valores de pH ao longo do processo de compostagem.

Valores de pH ao longo do processo de compostagem			
Data	Semana	Leira 1	Leira 2
		pH	pH
16/04/2015	1 ^a	4,98	4,72
27/04/2015	3 ^a	5,83	4,59
11/05/2015	5 ^a	6,36	6,13
25/05/2015	7 ^a	6,38	6,48
08/06/2015	9 ^a	6,84	6,85
22/06/2015	11 ^a	7,19	7,02
06/07/2015	13 ^a	7,75	7,55
20/07/2015	15 ^a	7	7

4.3 Sistemas de composteiras domésticas (vermicompostagem)

Nas Figuras 39 e 40 observa-se o resultado físico obtido na compostagem das composteiras domésticas 1 (verde) e 2 (azul), mostrando a transformação dos resíduos da 1^a à 15^a semana de experimento (104 dias). Comparando-se este tempo de processo, com as pesquisas encontradas na literatura, está acima da faixa de tempo descrita, que é de até 90 dias (AQUINO *et al.*, 2005; RAVI KUMAR *et al.*, 2009).

O processo foi considerado como encerrado, quando as composteiras começaram a atingir temperaturas abaixo da temperatura ambiente (15^a), mantendo-se constante. Entretanto, mesmo com as temperaturas das composteiras abaixo das do ambiente, ainda restavam muitos resíduos de serragem visíveis nas

composteiras, assim, optou-se por prosseguir as coletas da temperatura, até observar a diminuição dos resíduos restantes, o que ocorreu na 43ª semana.

Nota-se, nitidamente, a mudança de volume dos resíduos na caixa, que no início do processo está completa, e posteriormente, encontra-se com resíduos abaixo da metade, muito próximo ao fundo da composteira. E também, a mudança física dos resíduos, que ficaram bem escuros, semelhante a pó de café.

No total foram colocados 22 kg de resíduos em cada uma das composteiras, chegando ao final com 8,600 kg na composteira 1, e 10 kg na composteira 2.

A quantidade de amostras de resíduos retiradas da caixa 2 (que no início do processo estava na posição de caixa1) de cada composteira, em semanas alternadas, para as análises laboratoriais, foram em média 40 g para as análises de DBO e pH, e 24g para o cálculo de teor de umidade. Como foram realizadas oito análises, no total retirou-se 512g de amostras.

Figura 39: Resultado físico da caixa 2 da composteira 1.

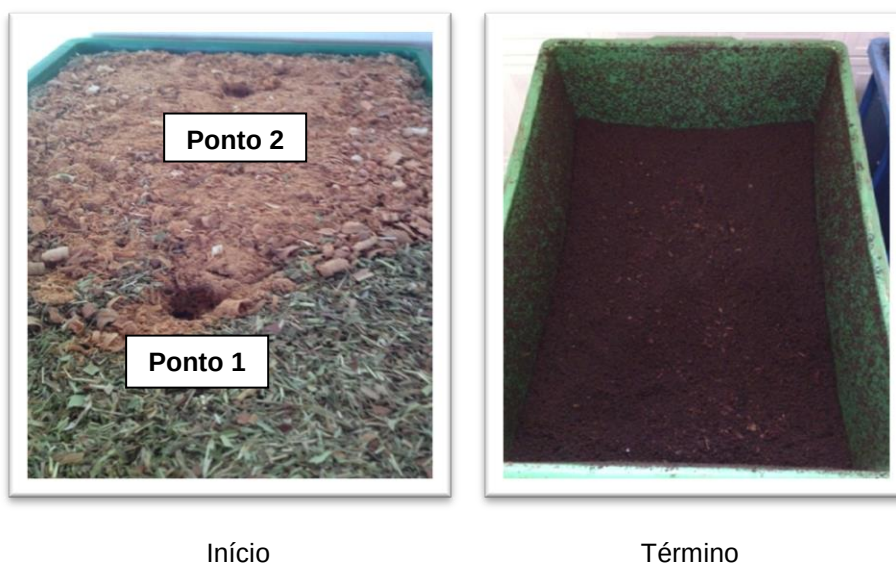
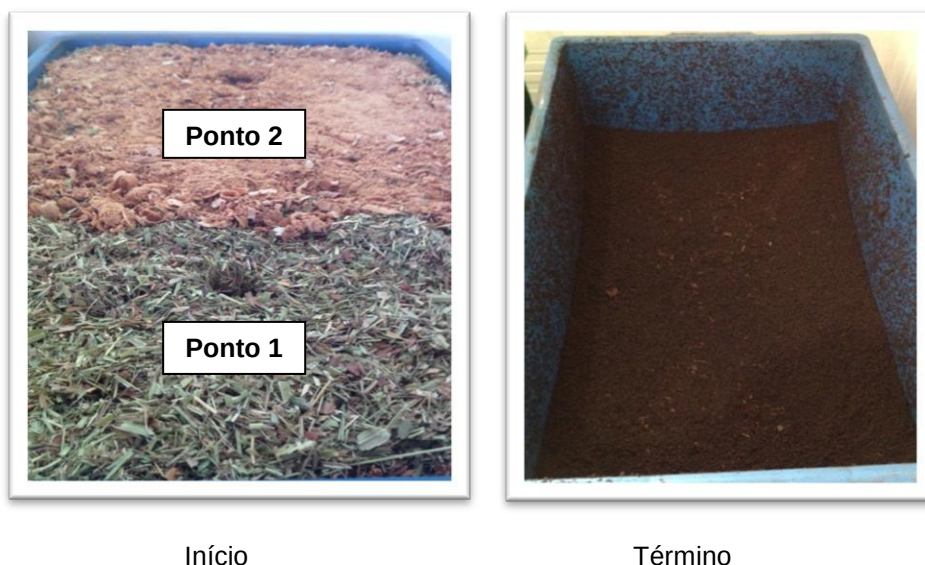


Figura 40: Resultado físico da caixa 2 da composteira 2.



Na Tabela 18 e nos gráficos das Figuras 41 e 42 observa-se a evolução das temperaturas coletadas ao longo da 1^a à 43^a semana do processo de compostagem nas composteiras domésticas, onde são apresentadas as médias semanais de cada composteira.

Observa-se que a máxima temperatura atingida na composteira 1 foi 31.4°C na caixa 1 e 29.9°C na caixa 2, e na composteira 2 foi 31.8°C na caixa 1 e 29.8°C na caixa 2, demonstrando que o processo, assim como nas leiras, ocorreu em região mesofílica (25°C a 43°C), nas duas composteiras, não alcançando a faixa de temperatura ideal para a compostagem que é de 40-65 °C, essencial para a eliminação de organismos patogênicos.

Barrena *et al.* (2014) apresentam pesquisa que também demonstra que as composteiras domésticas não alcançaram as temperaturas termófilas, concluindo que, a aeração das composteiras é crucial para a remoção de umidade, e que as temperaturas frequentemente termófilas não são alcançadas durante o processo.

Na pesquisa apresentada por Lleó *et al.* (2012), as temperaturas na vermicompostagem foram mantidas entre 15-20 °C.

Os autores Jasmin e Smith (2003) comentam ainda que, na compostagem doméstica a biomassa permanece em temperaturas mais baixas. E a diminuição de seu volume é lenta. No entanto, esse tempo de residência relativamente longo permite que o decaimento natural de patógenos ocorra.

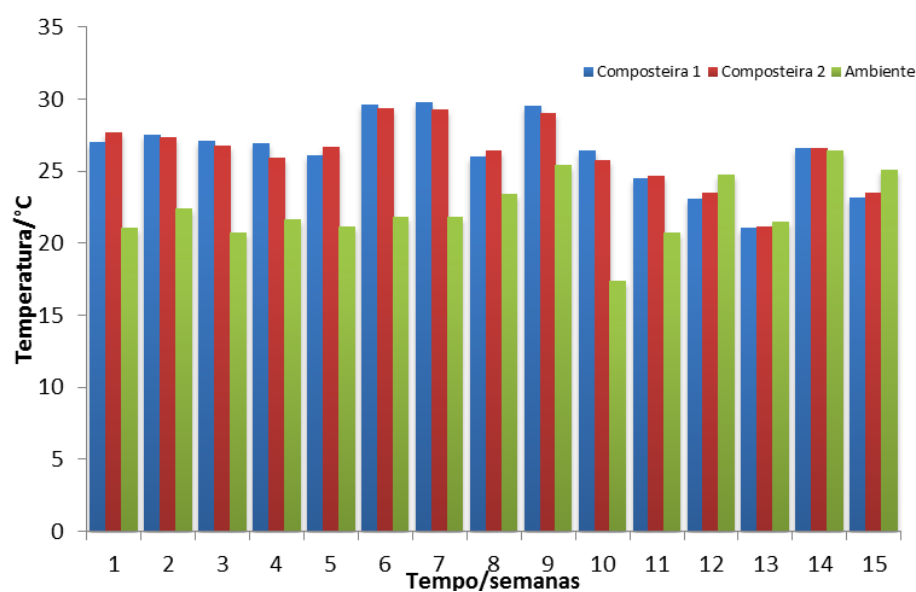
Nota-se também, que as temperaturas das caixas estão em equilíbrio, ou seja, as temperaturas da caixa 1 da composteira 1 estão próximas às temperaturas da caixa 1 da composteira 2, e o mesmo acontece para as caixas 2, durante todas as semanas.

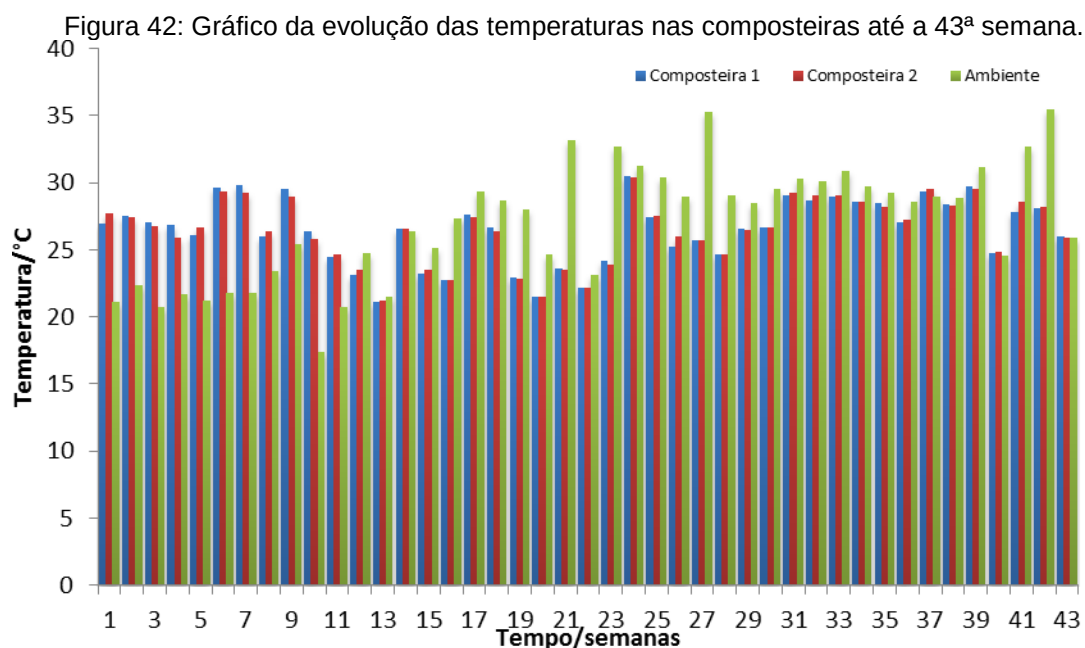
Tabela18: Evolução das temperaturas ao longo do processo de compostagem, expressa em °C.

TEMPERATURAS AO LONGO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM (°C)				
Semana	Composteira 1		Composteira 2	
	Caixa 1	Caixa 2	Caixa 1	Caixa 2
1 ^a	vazia	27	vazia	27.7
2 ^a	vazia	27.5	vazia	27.4
3 ^a	vazia	27.1	vazia	26.8
4 ^a	26.1	27.7	25.1	26.8
5 ^a	27.8	25.7	28.1	25.3
6 ^a	31.4	27.8	31.8	27
7 ^a	31	28.7	30.9	27.8
8 ^a	27	25.1	27.3	25.5
9 ^a	29.5	29.6	29.1	28.9
10 ^a	26	26.9	24.7	27
11 ^a	23.5	25.5	23.7	25.8
12 ^a	22.5	23.8	22.8	24.2
13 ^a	20.8	21.5	21	21.4
14 ^a	26.7	26.5	27.1	26.2
15 ^a	23.1	23.3	23.4	23.6
16 ^a	22.8	22.7	22.9	22.6
17 ^a	28.2	27.1	28.2	26.7
18 ^a	26.9	26.6	26.9	26
19 ^a	22.4	23.5	22.5	23.1
20 ^a	21.1	21.9	21.1	21.8
21 ^a	23.3	24	23.2	23.8
22 ^a	22.1	22.3	22.1	22.3
23 ^a	24.3	24.1	24.1	23.8
24 ^a	31.2	29.9	31	29.8
25 ^a	27.7	27.1	27.6	27.2
26 ^a	24.6	25.8	26.4	25.6
27 ^a	25.8	25.7	25.8	25.7
28 ^a	24.6	24.8	24.5	25
29 ^a	27	26.3	26.8	26.4
30 ^a	27	26.4	27	26.5
31 ^a	29.6	28.6	29.8	28.9
32 ^a	29.3	28.1	30.1	28.1
33 ^a	29.8	28.3	29.5	28.7

Semana	Composteira 1		Composteira 2	
	Caixa 1	Caixa 2	Caixa 1	Caixa 2
34 ^a	29.8	27.4	29.7	27.5
35 ^a	29.2	27.3	29.2	27.3
36 ^a	27.8	26.5	27.8	26.7
37 ^a	30.3	28.6	30.5	28.5
38 ^a	29.6	27.3	29.2	27.5
39 ^a	30.7	28.7	30.4	28.6
40 ^a	25.2	24.4	25.4	24.5
41 ^a	27.8	27.8	29.1	28.2
42 ^a	28.7	27.6	28.9	27.6
43 ^a	26.2	25.8	26.1	25.8

Figura 41: Gráfico da evolução das temperaturas nas composteiras até a 15ª semana.





Na Tabela 19 são apresentadas as temperaturas coletadas em dois pontos de cada caixa das composteiras (ponto 1 e ponto 2). Observa-se que há diferença de temperatura entre os pontos 1 e 2 de cada caixa, das duas composteiras, e que as temperaturas dos pontos da composteira 1 estão próximas as da composteira 2.

Tabela 19: Evolução das temperaturas ao longo do processo de compostagem, nos dois pontos de coleta das composteiras, expressas em °C.

Semana	Composteira 1				Composteira 2			
	Caixa 1		Caixa 2		Caixa 1		Caixa 2	
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 1	Ponto 2
1 ^a	vazia	vazia	27	26.2	vazia	vazia	27.7	26.9
2 ^a	vazia	vazia	29.1	25.9	vazia	vazia	28.7	26.3
3 ^a	vazia	vazia	27.8	26.4	vazia	vazia	26.7	26.8
4 ^a	23.9	26	28.5	27.2	22.7	24.8	27	26.5
5 ^a	26.3	27.3	26.4	24.6	27.7	27.1	25.4	25
6 ^a	31.5	31.4	28.4	27.2	31.7	31.5	27.4	26.7
7 ^a	30.9	31.1	29.9	27.6	30.8	31	28.8	26.8
8 ^a	27.2	27.1	26	24	27.9	26.8	27.1	23.9
9 ^a	29.1	29.9	30.2	29	29	29.2	29.4	28.5
10 ^a	23.5	24	25.7	26.3	23.5	24.1	26.6	26
11 ^a	24.8	24.4	25.9	26.9	24.5	24.9	26.3	26.9
12 ^a	22.6	22.5	23.5	24.2	22.7	22.9	23.8	24.6
13 ^a	20.9	20.7	20.9	22.1	21	21.1	21	21.9
14 ^a	26.8	26.6	25.9	27.1	27.1	27.1	25.6	26.8

Semana	Composteira 1				Composteira 2			
	Caixa 1		Caixa 2		Caixa 1		Caixa 2	
15 ^a	23.1	23.1	23	23.7	23.6	23.3	23.3	24
16 ^a	22.9	22.7	22.5	23	23.2	22.6	22.5	22.9
17 ^a	28.6	27.9	26.6	27.6	28.5	28	26.5	26.9
18 ^a	27.3	26.6	26.3	26.8	27.1	26.6	25.8	26.2
19 ^a	23.9	24.1	24.5	25.5	24.2	24.3	24.1	24.8
20 ^a	21	21.2	21.5	22.3	21.1	21.1	21.7	22
21 ^a	23.2	23.4	23.6	24.5	23.3	23.2	23.6	24
22 ^a	22.3	22	21.8	22.6	22.3	22.1	22.1	22.2
23 ^a	24.3	23.9	23.6	24.1	24	23.7	23.5	23.8
24 ^a	36.1	34.5	31.7	31.9	35.3	34.3	31.8	31.3
25 ^a	28.2	27.6	27	27.5	27.9	27.7	27.2	27.4
26 ^a	27.4	25.9	26.1	25.6	26.8	26.1	25.7	25.6
27 ^a	26	25.7	25.6	26.1	25.8	25.7	25.8	26.2
28 ^a	24.6	24.6	24.5	25.1	24.5	24.4	24.7	25.3
29 ^a	27.2	27	26.3	26.4	26.9	26.8	26.4	26.4
30 ^a	28.8	28.7	27.4	27.3	28.8	28.8	27.5	27.5
31 ^a	30	29.9	28.8	28.9	30	30.3	28.9	28.9
32 ^a	29.5	29	27.9	27.8	29.5	30	28.2	28
33 ^a	29.8	29.8	28.2	28.4	29.2	29.8	28.4	28.7
34 ^a	30.4	29.2	27.7	27.4	29.9	29.4	27.6	27.3
35 ^a	29.4	28.9	27.5	27.2	28.7	29.3	27.4	27.5
36 ^a	27.7	27.8	26.4	26.7	27.5	28.2	26.6	26.7
37 ^a	30.8	29.8	28.8	28.5	30.3	30.8	28.7	28.3
38 ^a	28.7	27.7	26.3	26.4	27.9	27.6	26.4	26.4
39 ^a	29.3	28.1	27.5	26.8	28.8	28.3	27.1	26.8
40 ^a	25.3	25.1	24.2	24.4	25.2	25.4	24.3	24.7
41 ^a	26.8	28.8	27.8	27.8	29.3	28.9	28.2	28.1
42 ^a	28.7	28.7	27.6	27.6	29.1	28.6	27.6	27.6
43 ^a	26.3	26.1	25.9	25.7	26.1	26.1	25.9	25.8

Na Tabela 20 são apresentados os valores de teor de umidade das amostras em compostagem nas composteiras. Nota-se que a umidade começou baixa na 1^a semana (20%), subindo a partir da 3^a, ficando dentro da faixa ideal, e posteriormente, alcançando maiores valores, fora da faixa ideal, que deve ser de 50-60%, nas duas composteiras. As médias de umidade ficaram dentro da faixa ideal (50% e 53%) ao longo das quinze primeiras semanas.

Não foi constatada a formação de líquido (composto líquido) nas composteiras. Este líquido pode ser produzido durante a decomposição dos resíduos, se houver excesso de umidade, o que não ocorreu neste experimento.

Tabela 20: Valores de teor de umidade da massa de resíduos ao longo do processo.

Teor de Umidade (%)			Irrigação (litros)	Umidade relativa do ar/mês (%)
Semanas	Composteira 1	Composteira 2		
1 ^a	20	20	2,5	77,8
3 ^a	50	50		
5 ^a	50	50	2,5	81,7
7 ^a	50	50		
9 ^a	50	50	2,5	73,7
11 ^a	50	75		
13 ^a	61	67	2,5	74,6
15 ^a	69	62		
Média	50	53		

Na Tabela 21, nota-se que os valores de oxigênio necessários para decompor a matéria orgânica, iniciaram-se altos nas duas composteiras, e foram diminuindo com o passar do tempo da compostagem, o que indica a evolução do processo, já que a demanda de oxigênio para degradar os resíduos diminuiu ao longo do tempo.

O aumento da DBO que ocorreu durante algumas semanas, pode ser associado ao fato dos resíduos de serragem terem demorado bem mais para se decompor do que os outros resíduos, deixando as amostras mais heterogêneas, o que contribuiu para as alterações de valores em algumas semanas. No entanto, na última semana analisada os valores estavam bem mais baixos do que os valores iniciais do processo de compostagem (composteira 1: de 4800 mg/L para 400 mg/L; composteira 2: de 4200 mg/L para 520 mg/L).

Tabela 21: Valores de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) ao longo do processo de compostagem, expressos em mg/L.

Valores de DBO ao longo do processo de compostagem (mg/L)			
Data	Semana	Composteira 1	Composteira 2
		DBO	DBO
16/04/2015	1 ^a	4800	4200
27/04/2015	3 ^a	4300	4000
11/05/2015	5 ^a	4120	2160
25/05/2015	7 ^a	2200	1400
08/06/2015	9 ^a	1280	940
22/06/2015	11 ^a	680	920
06/07/2015	13 ^a	600	640
20/07/2015	15 ^a	400	520

Os valores de pH das amostras são apresentados na Tabela 22. O pH durante a 1ª semana da compostagem estava abaixo de 5,0 (ácido), mas se elevou gradativamente, assim como descrito na literatura, passando pelo pH 7,0 (neutro). Estes resultados estão de acordo com os observados por Sundberg *et al.* (2004) e Yu e Huang (2009), cuja faixa ideal situou-se entre 6,5 e 7,5.

Não alcançou valores acima de 8,0 com o desenvolvimento do processo, que são valores normais para a compostagem (MANIOS, 2004).

Normalmente, o pH se mantém alcalino (7,5-9,0), durante a fase termófila, entretanto, a compostagem não atingiu a fase termófila, permanecendo apenas na fase mesófila (inicial), o que explica o pH não ter atingido valores acima de 8,0.

Tabela 22: Valores de pH ao longo do processo de compostagem.

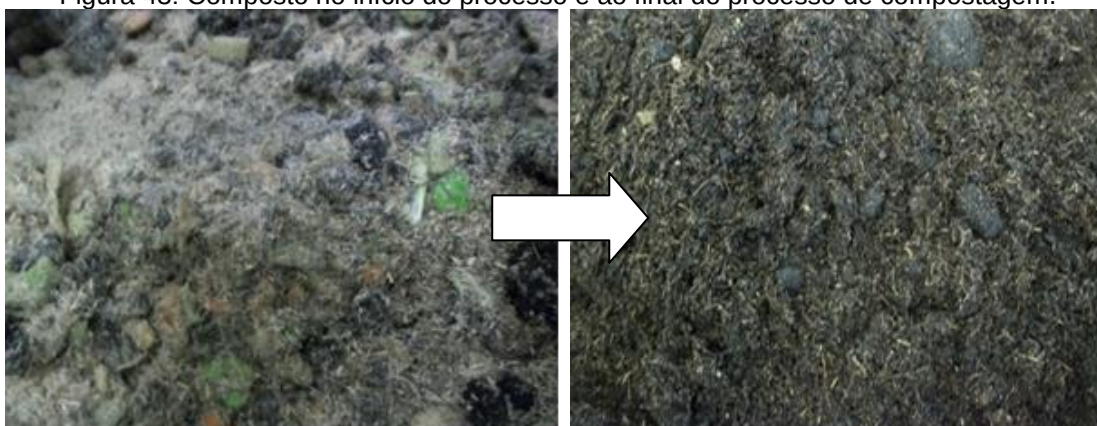
Valores de pH ao longo do processo de compostagem			
Data	Semana	Composteira 1	Composteira 2
		pH	pH
16/04/2015	1ª	4,63	4,98
27/04/2015	3ª	4,58	4,60
11/05/2015	5ª	5,58	5,28
25/05/2015	7ª	5,11	5,31
08/06/2015	9ª	6,57	6,84
22/06/2015	11ª	6,75	6,62
06/07/2015	13ª	6,98	6,93
20/07/2015	15ª	6,90	7,51

4.4 Sistema de reator

Os resultados apresentados a seguir referem-se a uma campanha piloto realizada em 2013, realizados com resíduos de alimentos do restaurante, borra de pó de café e bagaço de cana-de-açúcar, não sendo utilizados a serragem e os resíduos de poda de grama.

Na Figura 43 observa-se o resultado físico obtido na compostagem realizada em reator biológico (batelada), mostrando a transformação dos resíduos em 13 dias de experimento. A massa do composto foi reduzida de 10,58 kg para 9,94kg, ou seja, houve uma redução de 64g.

Figura 43: Composto no início do processo e ao final do processo de compostagem.



4.4.1 Tempo de processamento da batelada de compostagem

Na Tabela 23 são apresentados os dados obtidos na batelada e indicam o tempo gasto para que o consumo de O_2 a partir do início do processo, com percentual apresentando o valor de aproximadamente 20% do total da mistura gasosa no interior do reator, fosse reduzido para até 3% dessa mistura, a partir do qual se ativou automaticamente a purga, ou seja, a eliminação da mistura gasosa e a introdução de ar ambiente.

Tabela 23: Tempo gasto para consumo do oxigênio existente no interior do reator em cada ciclo de purga.

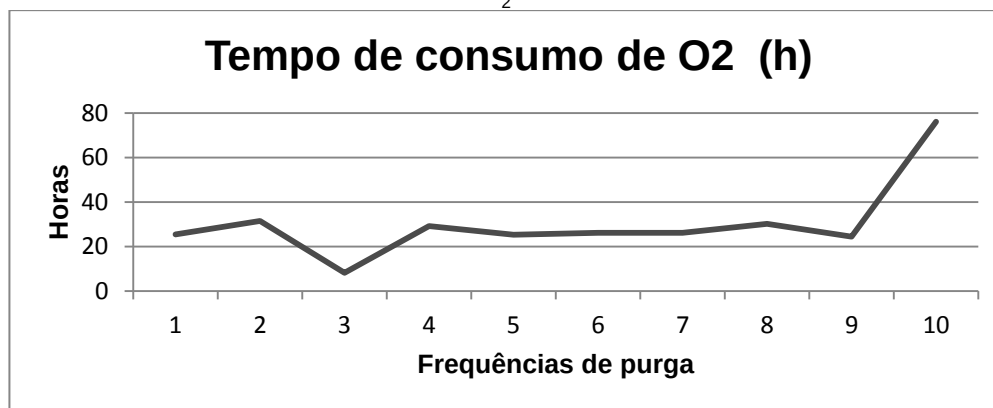
CICLOS DE PURGA	DATA DE INÍCIO	DATA DE ENCERRAMENTO	TEMPO (h)	TEMPO (min)	HORAS ACUMULADAS	MINUTOS ACUMULADOS
1	28.11	29.11	25,4	1540	25,4	1540
2	29.11	30.11	31,45	1905	50,8	3080
3	30.11	30.11	8,19	499	82,25	4985
4	30.11	01.12	29,2	1760	90,44	5484
5	01.12	02.12	25,35	1535	119,64	7244
6	03.12	04.12	26,1	1570	144,99	8779
7	04.12	05.12	26,1	1570	171,09	10349
8	05.12	06.12	30,2	1820	197,19	11919
9	06.12	07.12	24,5	1490	227,39	13739
10	07.12	10.12	76,12	4572	251,89	15229
TEMPO MÉDIO			30,26	1826,1	-	-

Verificou-se que, no total, foram completados 10 ciclos de purga, no tempo total de 251,89 horas, em 13 dias de processo, com tempo médio de purga de aproximadamente 30h26 min cada.

Comparando-se este tempo de processamento com pesquisas como as de Kopčić *et al.* (2013) e Scoton *et al.* (2015), que se utilizaram de reatores de batelada com quantidades próximas a massa de resíduos utilizada neste trabalho, verificou-se que o resultado obtido está na faixa de tempo apresentado por estes autores, que foram 22 dias e 39 dias, respectivamente, demonstrando ser um processo de compostagem mais acelerado, quando comparado as leiras e composteiras.

A Figura 44 apresenta o tempo de consumo de O_2 com relação ao volume total de gases no interior do reator, para os intervalos entre cada uma das purgas. Verificou-se que para o período de 28 de novembro a 6 de dezembro, isto é, do 1º ao 9º ciclo do processo, o tempo de consumo se manteve baixo, ficando alto somente no último ciclo do processo, período no qual, conclui-se que ocorreu a estabilização na decomposição do composto.

Figura 44: Tempo gasto para consumo de O_2 até que o mesmo atinja 3% do valor total de gases.



4.4.2 Relação entre o consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico, analisados pelas unidades de massa e volume

Através da Tabela 24, verificam-se as relações entre o consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico, analisados sob as unidades de medida de massa (gramas) e volume (litros) em cada um dos 10 ciclos de purga que ocorreram durante o período de decomposição dos resíduos.

Tabela 24: Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido em cada ciclo de purga.

CICLOS DE PURGA	DATA	% O ₂	% CO ₂	CONSUMO DE O ₂ (gramas)	CONSUMO DE O ₂ (litros)	PRODUÇÃO DE CO ₂ (gramas)	PRODUÇÃO DE CO ₂ (litros)
1	29.11	17,19	16,5	7,36	10,3	13,26	9,9
2	30.11	18,19	16,29	7,8	10,92	13,09	9,77
3	30.11	17,48	12,98	7,49	10,49	10,43	7,79
4	01.12	16,4	12,65	7,03	9,84	10,17	7,59
5	02.12	15,44	14,39	6,62	9,27	11,56	8,63
6	04.12	9,09	8,89	3,9	5,46	7,14	5,33
7	05.12	10,84	10,62	4,65	6,51	8,53	6,37
8	06.12	17,27	16,42	7,4	10,36	13,19	9,85
9	07.12	12,58	11,76	5,39	7,55	9,45	7,06
10	10.12	11,15	10,8	4,78	6,69	8,68	6,48
TOTAL				62,42	87,39	105,5	78,77

Na Tabela 24 e nas Figuras 45 e 46 são apresentados os seguintes dados calculados em cada um dos ciclos de purga:

- Percentual de O₂ – apresenta a faixa de valores entre o percentual inicial (início da purga) menos o percentual final (purga).
- Percentual de CO₂ – apresenta a faixa de valores entre o percentual inicial (início da purga) menos o percentual final (purga).
- Consumo de O₂ – Massa - valores em gramas calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, conforme a Equação 1:

$$O_2(g) = \frac{60 \times 16 \times \%O_2}{22,4} \quad (1)$$

Onde:

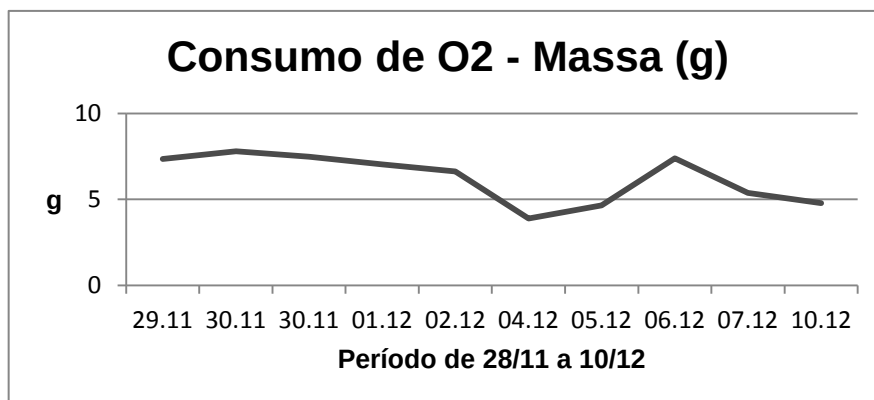
60 L = volume aproximado da mistura gasosa presentes no reator;

16 = massa de 1 mol de O₂;

% O₂ = range percentual de oxigênio presente na mistura gasosa;

22,4 L = volume que ocupa 1 mol de O₂ nas condições normais de temperatura e pressão.

Figura 45: Consumo de oxigênio expresso em massa (g) durante o processo.



Nota-se que ao final do processo o consumo cai progressivamente, o que confirma o final do processo de decomposição dos resíduos. Verifica-se também, que ao final do período de 13 dias foram consumidos aproximadamente 62,42 gramas de oxigênio.

- d) Consumo de O₂ – Volume - valores em litros calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, conforme a Equação 2:

$$O_2(l) = \frac{\%O_2 \times 22,4}{16} \quad (2)$$

Onde:

% O₂ = range percentual de oxigênio presente na mistura gasosa;
 22,4 L = volume que ocupa 1 mol de O₂ nas condições normais de temperatura e pressão;
 16 = massa de 1 mol de O₂.

- e) Produção de CO₂ – Massa - valores em gramas calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, através da Equação 3:

$$CO_2(g) = \frac{60 \times 30 \times \%CO_2}{22,4} \quad (3)$$

Onde:

60 L = volume aproximado da mistura gasosa presentes no reator;

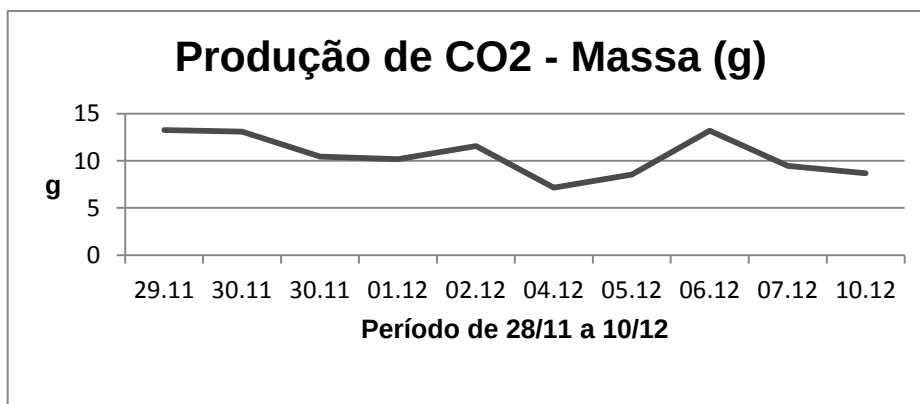
30 = massa de 1 mol de CO_2 ;

% CO_2 = range percentual de gás-carbônico presente na mistura gasosa;

22,4 L = volume que ocupa 1 mol de O_2 nas condições normais de temperatura e pressão.

Analisa-se na Figura 46 a produção de gás carbônico durante os ciclos de purga, neste caso utiliza-se como unidade de medida a massa (gramas). A produção total de gás carbônico, valor dado em massa, foi de aproximadamente 105,5 g.

Figura 46: Produção de gás carbônico expresso em massa (g) durante o processo.



- f) Produção de CO_2 – Volume – valores em litros calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, através da Equação 4:

$$CO_2(l) = \frac{\%CO_2 \times 22,4}{30} \quad (4)$$

Onde:

% CO₂ = range percentual de gás carbônico na mistura gasosa;

22,4 L = volume que ocupa 1 mol de CO₂ nas condições normais de temperatura e pressão;

30 = massa de 1 mol de CO₂.

4.4.3 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Através do valor da DBO tem-se a vazão de gás oxigênio necessária para se decompor uma matéria orgânica, assim pode-se calcular o tempo, e quantidade de gás para que ocorra a compostagem, ou seja, é possível fazer o dimensionamento de todo o processo e do reator a ser utilizado.

Os valores de DBO são demonstrados na Tabela 25 em mg/kg, já que os resíduos encontram-se na fase sólida, no total de 10,58 kg.

Tabela 25: Valores referentes a produção de CO₂ e consumo de O₂ e cálculo da DBO – demanda bioquímica de oxigênio em mg/kg.

CICLOS DE PURGA	DATA	PRODUÇÃO DE CO ₂ (gramas)	CONSUMO DE O ₂ (gramas)	CO ₂ (mg/kg)	DBO - O ₂ (mg/kg)
1	29.11	13,26	7,36	1253	695
2	30.11	13,09	7,8	1237	737
3	30.11	10,43	7,49	985	707
4	01.12	10,17	7,03	961	664
5	02.12	11,56	6,62	1092	625
6	04.12	7,14	3,9	674	368
7	05.12	8,53	4,65	806	439
8	06.12	13,19	7,4	1246	699
9	07.12	9,45	5,39	893	509
10	10.12	8,68	4,78	820	451

Os valores de DBO, apresentados na Tabela 25 obtêm-se a partir da Equação 5:

$$DBO = \frac{O_2(g)}{10,58(kg)} \cdot 1000 \quad (5)$$

Onde:

DBO = Demanda bioquímica de oxigênio;

$O_2(g)$ = total de oxigênio em massa (g), consumido no ciclo de purga;

10,58kg = massa de resíduos presentes no reator;

1000 = para representação dos valores em miligramas.

4.4.4 Umidade

O teor de umidade da massa em compostagem foi calculado nas duas semanas de processo, utilizando-se 10g de amostra para cada análise, ou seja, 20g foram retiradas de amostra do reator.

Os resultados permaneceram dentro da faixa ideal para a compostagem (entre 50-65%), e são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26: Umidade da massa de resíduos ao longo do processo de compostagem.

Semanas	Teor de Umidade (%)
1 ^a	57
2 ^a	50

4.5 Comparação dos três sistemas

Comparando-se os resultados apresentados anteriormente, dos três sistemas de compostagem (leira 1, leira 2, composteira 1, composteira 2 e reator), foram obtidos as tabelas e gráficos a seguir.

4.5.1 Tempo de processo

Quanto ao tempo para a estabilização dos compostos, no caso do sistema de leira e do sistema de compostagem doméstica (vermicompostagem), que estabilizaram 22kg de resíduos cada, o processo na leira esteve dentro do tempo descrito na literatura, que é de até 180 dias. Na composteira, foi acima do tempo esperado, que é de até 90 dias.

No sistema de leiras o processo durou 110 dias e no sistema das composteiras 104 dias.

Alguns fatores foram observados nesta pesquisa, e que podem ter contribuído para as falhas no desenvolvimento do processo de compostagem nas leiras e nas composteiras, como: a configuração geométrica da pilha e seu tamanho; o maior volume de resíduos secos em relação aos resíduos mais úmidos (pesam mais), o que pode ter ocasionado a falta de umidade na terceira semana de compostagem nas leiras; às condições ambientais do local onde foram construídas as leiras (muito sol e vento), contribuindo para as alterações do processo; à pouca aeração nas composteiras; ao fato de alguns resíduos, como a serragem, ser mais difíceis de serem decompostos, aumentando assim o tempo do processo, principalmente nas composteiras, que utilizaram minhocas (vermicompostagem); e também à alta relação C/N do resíduo de serragem (106,5), que pode ter contribuído para a falta de nitrogênio na mistura.

Segundo Zhou *et al.* (2014), em geral, os agentes de volume mais utilizados na mistura de compostagem são as serraduras, que fornecem a lignina. No entanto, a taxa de degradação da serragem é normalmente lenta. Uma mistura de compostagem contendo teores mais elevados de lignina pode acelerar a formação de substâncias húmicas estáveis. Entretanto, nenhum relatório sobre esta questão está disponível a partir da literatura, o que garante uma investigação mais aprofundada. E uma melhor compreensão das funções de minhocas na vermicompostagem é necessária para melhorar o processo e esclarecer os mecanismos envolvidos (SOOBHANYA *et al.*, 2015).

As minhocas utilizadas nesta pesquisa, Californianas ou Vermelhas (*Eisenia foetida*), se adaptaram bem ao ambiente das composteiras, reproduzindo-se e aumentando significativamente a população de minhocas. Outros animais também habitaram as composteiras, como formigas, aranhas e pequenos insetos. As formigas, apenas nas duas primeiras semanas de processo. Os outros insetos permaneceram, mas em pequena quantidade, não interferindo no crescimento das minhocas.

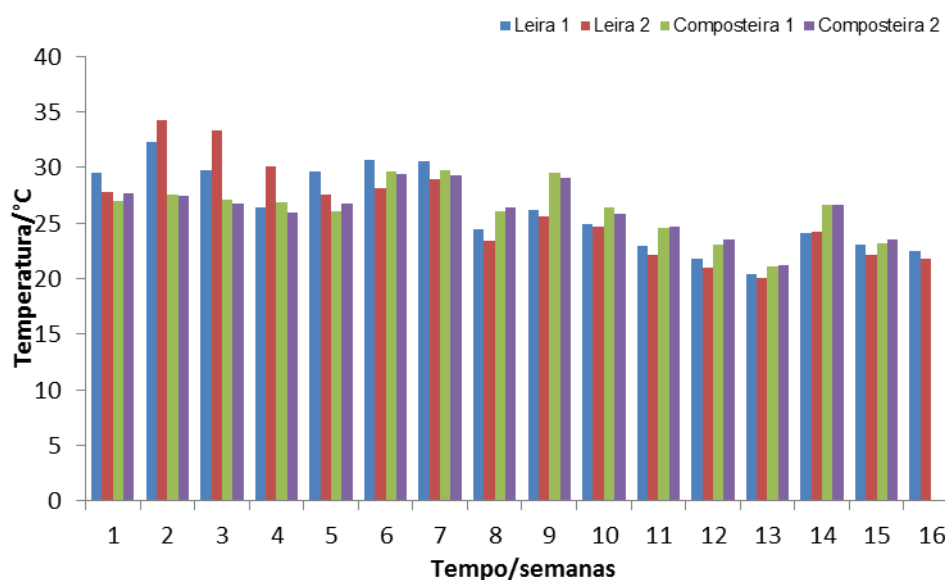
4.5.2 Temperatura

Na Tabela 27 e na Figura 47 são apresentados os valores das temperaturas dos sistemas de compostagem ao longo do processo.

Tabela 27: Temperatura em °C dos sistemas em função do tempo de compostagem.

Semana	Leira 1	Leira 2	Composteira 1	Composteira 2
1	29.5	27.8	27	27.7
2	32.3	34.3	27.5	27.4
3	29.7	33.3	27.1	26.8
4	26.4	30.1	26.9	25.9
5	29.6	27.6	26.1	26.7
6	30.7	28.1	29.6	29.4
7	30.6	28.9	29.8	29.3
8	24.4	23.4	26	26.4
9	26.2	25.6	29.5	29
10	24.9	24.7	26.4	25.8
11	22.9	22.1	24.5	24.7
12	21.8	21	23.1	23.5
13	20.4	20	21.1	21.2
14	24.1	24.2	26.6	26.6
15	23.1	22.1	23.2	23.5
16	22.5	21.8	-	-

Figura 47: Gráfico das temperaturas dos sistemas de compostagem.



Através da análise dos dados da Tabela 27 e do gráfico da Figura 47, é possível verificar que as temperaturas, nos quatro sistemas, mantiveram-se inconstantes, subindo e descendo ao longo de todo o processo. Mantendo, porém,

as temperaturas sempre abaixo de 35°C, não alcançando a faixa de temperatura ideal para a compostagem que é de 40-65 °C. O que demonstra que o processo está ocorrendo em região mesofílica (25°C a 43°C), não alcançando a fase termofílica da compostagem (45° a 85°C), importante para a higienização do composto.

O que pode demonstrar o desequilíbrio, falha da construção ou da manutenção dos sistemas. A dimensão menor das leiras; a falta de água (umidade) durante as primeiras semanas do processo nas leiras; as condições ambientais do local onde foram construídas (muito sol e vento); as características de difícil degradação de alguns resíduos (serragem), e a falta de aeração dos sistemas das composteiras, por exemplo.

No caso das composteiras, pesquisas como a de Barrena *et al.* (2014) demonstram que as composteiras domésticas não alcançam as temperaturas termófilas. Concluindo que, a aeração das composteiras é crucial para a remoção de umidade, e que as temperaturas frequentemente termófilas não são alcançadas durante o processo.

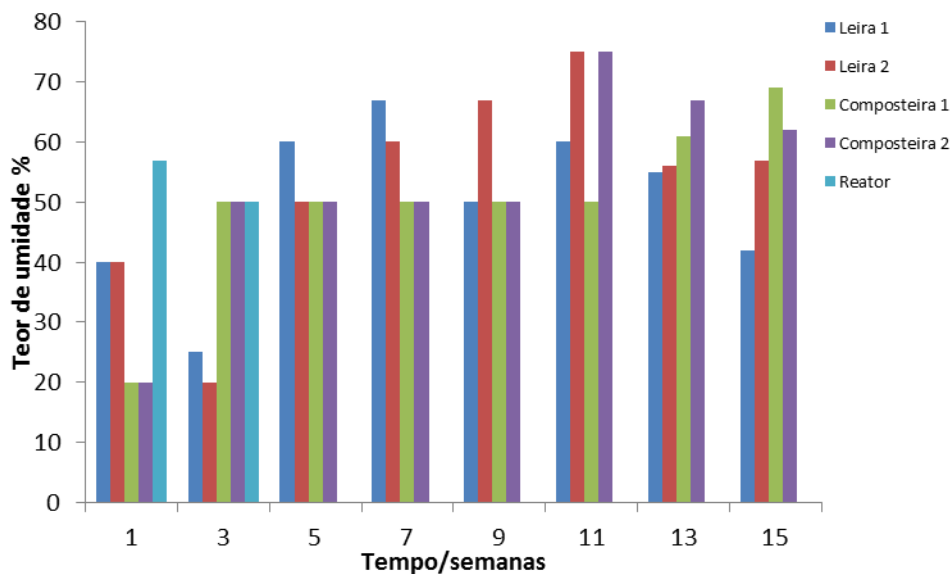
4.5.3 Umidade

Na Tabela 28 e na Figura 48 observam-se os valores de teor de umidade (%) das amostras dos sistemas de compostagem ao longo do processo.

Tabela 28: Umidade das amostras em função do tempo de compostagem.

Semana	Leira 1	Leira 2	Composteira 1	Composteiras 2
1	40	40	20	20
3	25	20	50	50
5	60	50	50	50
7	67	60	50	50
9	50	67	50	50
11	60	75	50	75
13	55	56	61	67
15	42	57	69	62
Média	50	53,1	50	53

Figura 48: Gráfico dos valores de umidade dos sistemas de compostagem.



Através da análise dos dados da Tabela 28 e do gráfico da Figura 48, é possível verificar que a umidade das amostras dos quatro sistemas de compostagem iniciaram-se baixas ou dentro da faixa ideal (50% a 65%), no caso do reator (57%). Nas leiras houve uma queda grande na umidade na 3ª semana (25% e 20%), o que pode ter prejudicado o desenvolvimento da compostagem. No entanto, voltou a subir a partir da 5ª semana, mantendo-se em valores ideais e altos na maior parte do processo, assim como os outros sistemas.

Em relação às médias de umidade, os cinco sistemas apresentaram médias dentro da faixa ideal para compostagem.

4.5.4 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

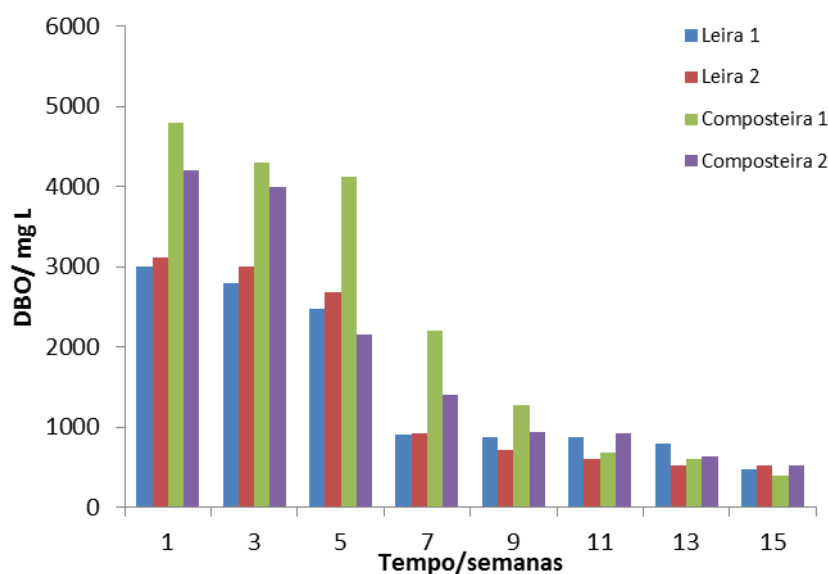
Na Tabela 29 e na Figura 49 são apresentados os valores de DBO das amostras dos quatro sistemas de compostagem ao longo do processo.

Tabela 29: Valores de DBO expressos em mg/L, dos sistemas de compostagem.

Semana	Leira 1	Leira 2	Composteira 1	Composteiras 2
1	3000	3120	4500	4200
3	2800	3000	4300	4000
5	2480	2680	4120	2160
7	900	920	2200	1400
9	880	720	1280	940
11	880	600	680	920
13	800	520	600	640
15	480	520	400	520

Na Figura 49 é apresentado o gráfico da evolução da DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) dos sistemas ao longo do processo de compostagem. Observa-se que nos quatro sistemas o processo iniciou-se com DBO alta, entre 2000 e 4500 mg/L, e com o passar do tempo da compostagem foi diminuindo, passando por uma faixa entre 400 e 1000 mg/L. O que demonstra a evolução da compostagem nos sistemas, uma vez que segundo a literatura, a DBO durante o desenvolvimento do processo de compostagem tende a diminuir com o passar do tempo (GEA *et al.*, 2004; SCOTON *et al.*, 2015).

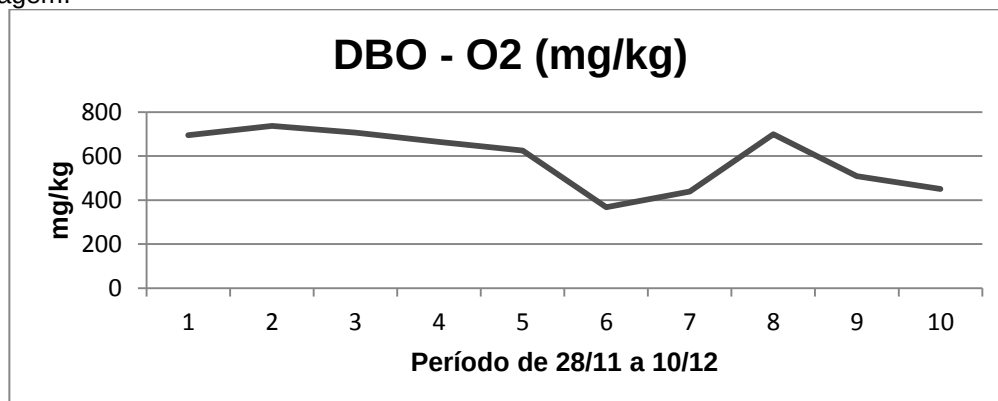
Figura 49: Gráfico dos valores de DBO dos sistemas de compostagem.



No caso do reator biológico, a DBO foi calculada através de expressões já apresentadas acima, para cada ciclo de purga, ao longo das duas semanas de processo, não ocorrendo a retirada de amostras do reator. Conforme a tabela 25.

A Figura 50 apresenta o gráfico com a evolução da DBO no período de compostagem no reator. Demonstrando também, a sua queda ao final do processo.

Figura 50: Distribuição da DBO - demanda bioquímica de oxigênio durante o processo de compostagem.



4.5.5 pH

Na Tabela 30 são apresentados os valores de pH das amostras dos sistemas de compostagem ao longo do processo.

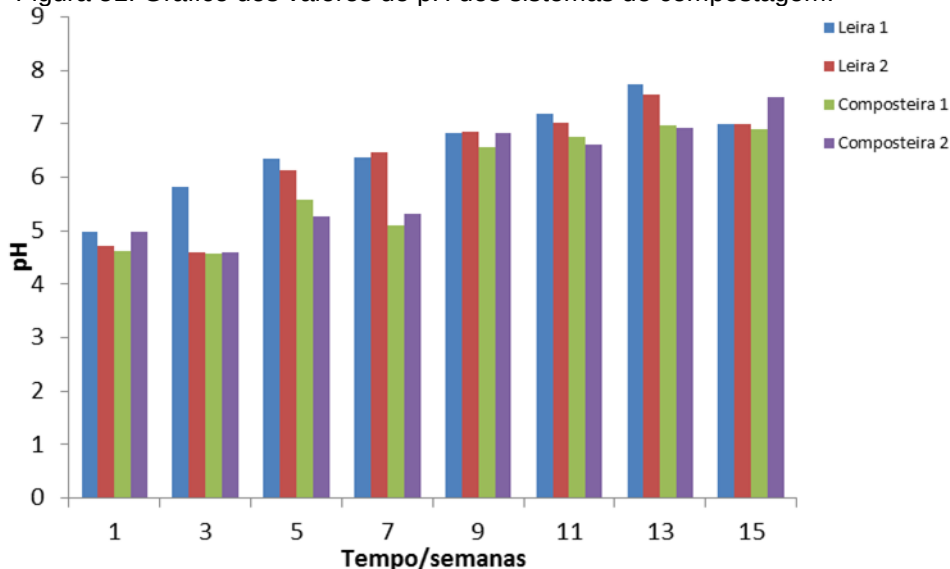
Tabela 30: Valores de pH dos sistemas de compostagem.

Semana	Leira 1	Leira 2	Composteira 1	Composteira 2
1	4,98	4,72	4,63	4,98
3	5,83	4,59	4,58	4,60
5	6,36	6,13	5,58	5,28
7	6,38	6,48	5,11	5,31
9	6,84	6,85	6,57	6,84
11	7,19	7,02	6,75	6,62
13	7,75	7,55	6,98	6,93
15	7	7	6,9	7,51

Na Figura 51 é apresentado o gráfico da evolução dos valores de pH dos sistemas ao longo do processo de compostagem. Observa-se que o pH dos quatro sistemas iniciaram-se ácidos, e se elevaram gradativamente com o desenvolvimento da compostagem, alcançando o pH alcalino.

Na última semana analisada, os valores de pH estão neutros na leira 1(7,0) e na leira 2 (7,0), ácido na composteira 1 (6,90), e alcalino na composteira 2 (7,51). Como observado, o processo de compostagem não avançou para a segunda fase do processo, a fase termófila, mantendo-se na fase mesófila, o que explica o pH dos sistemas terem se mantido neutros (leiras) e ácido (composteira 1), conseguindo somente, alcançar um nível baixo de alcalinidade (composteira 2). Uma vez que, segundo Yu e Huang (2009), na fase termófila, normalmente, o pH se mantém alcalino (7,5-9,0), e se eleva rapidamente, o que não ocorreu nos sistemas. Porém, os valores de pH se mantiveram dentro da faixa ideal para compostagem, que está entre 6,5-7,5.

Figura 51: Gráfico dos valores de pH dos sistemas de compostagem.



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio dos experimentos, e com os resultados obtidos, pode-se comparar os três modelos de processo de compostagem, dois tidos como industriais (compostagem em reator e em leira) e um artesanal (compostagem doméstica). Os experimentos de compostagem em leira e da compostagem doméstica (composteira) foram construídos e acompanhados, e no caso do reator, não foi possível a execução do experimento com os mesmos resíduos dos outros sistemas, em função de vários e sucessivos problemas no equipamento que não puderam ser resolvidos no horizonte de tempo disponível para esta pesquisa. Foram utilizados para a comparação dos três modelos, os resultados referentes a uma campanha piloto realizada em 2013, realizados com os resíduos de alimentos, borra de pó de café e bagaço de cana-de-açúcar, não sendo utilizados a serragem e os resíduos de poda de grama.

Quanto ao tempo para a estabilização dos compostos, o sistema de leira e o de compostagem doméstica, que estabilizaram 22kg de resíduos cada, o processo na leira esteve dentro do tempo descrito na literatura. Na composteira, foi acima do tempo esperado. No sistema de leiras o processo durou 110 dias e no sistema das composteiras 104 dias. No caso do reator biológico, que estabilizou 10,58kg de resíduos, o tempo de processamento foi bem menor comparado aos sistemas das leiras e das composteiras, ocorrendo em 13 dias, demonstrando ser o método mais rápido, como descrito na literatura.

Foi possível verificar que as temperaturas, nos quatro sistemas, mantiveram-se inconstantes ao longo de todo o processo, mantendo, porém, as temperaturas sempre abaixo de 35°C, o que demonstra que o processo ocorreu em região mesofílica (25°C a 43°C), não alcançando a fase termofílica da compostagem (45°C a 85°C). Em relação à umidade, as médias de teor de umidade dos cinco sistemas apresentaram médias dentro da faixa ideal para compostagem. A DBO apresentou a evolução das compostagens, uma vez que segundo a literatura, a DBO durante o desenvolvimento do processo de compostagem tende a diminuir com o passar do tempo, como ocorreu nesta pesquisa. O pH dos quatro sistemas iniciaram-se ácidos, e se elevaram gradativamente com o desenvolvimento da compostagem,

alcançando o pH alcalino, mantendo-se dentro da faixa ideal para compostagem, que está entre 6,5-7,5.

Alguns fatores foram observados nesta pesquisa, e que podem ter contribuído para as falhas no desenvolvimento do processo de compostagem nas leiras e nas composteiras, em relação às características do material a ser compostado, a manutenção dos sistemas, a disponibilidade de nutrientes, a configuração geométrica da pilha (construção das leiras), e a aeração nas composteiras.

Buscando uma melhor forma de destinação dos resíduos sólidos orgânicos, e comparando-se os parâmetros, tempo para estabilização do composto (tempo de processo de compostagem) e qualidade do composto final, tem-se que o sistema de compostagem em reator é o modelo mais rápido. Quanto à qualidade do composto, nenhum dos sistemas de compostagem obteve um composto de boa qualidade para o seu uso na agricultura, apresentando somente alguns parâmetros dentro das normas específicas para o uso no solo.

O experimento em laboratório do sistema de reator apresentou diversas falhas em seus equipamentos, sendo observada a necessidade de uma nova formulação e estruturação do piloto de compostagem. No entanto, o método respirométrico utilizado no piloto de compostagem, demonstra ser uma alternativa útil e confiável em relação às respostas fornecidas pelo mesmo no acompanhamento operacional e avaliativo do processo de degradação dos resíduos, comprovado em pesquisas anteriores já publicadas, e no trabalho de 2013, aqui apresentado.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, pode-se concluir que:

- Quanto ao tempo para a estabilização do composto, o sistema de reator biológico em laboratório foi o método mais rápido, com treze dias de processo de compostagem, seguido pela composteira doméstica (104 dias) e pela leira (110 dias);
- Os processos de compostagem ocorreram em região mesófila (25°C a 43°C), não alcançando a fase seguinte do processo (fase termófila);
- Apresentaram valores de teor de umidade, pH e DBO dentro da faixa ideal para compostagem;
- Apresentaram baixa concentração dos nutrientes N e P, demonstrando a pouca qualidade do composto, assim como o valor de mercado para aplicação no solo;
- Houve falhas no desenvolvimento dos processos de compostagem, em relação às características do material a ser compostado, a manutenção dos sistemas, a disponibilidade de nutrientes, a configuração geométrica da pilha (construção das leiras), e a aeração nas composteiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADANI, F.; CONFALONIERE, R.; TAMBONE, F. Dynamic Respiration Index as a Descriptor of the Biological Stability of Organic Wastes. **Journal of Environmental Quality**, v.33, p.1866-1876, 2004.
- ADHIKARI, B. K.; BARRINGTON, S.; MARTINEZ, J. Predicted growth of world urban food waste and methane production. **Waste Management & Research**, v. 24, n. 5, p. 421–433, 2006.
- AGNEW, J. M.; LEONARD, J. J. A modified air pycnometer for compost air volume and density determination. **Can. Biosyst. Eng.**, v. 45, p. 27–35, 2003.
- AKUTSU, J.; MARTINS J.E.M.P.; CASTILHO G.S.; RENÓFIO A.; ISA M.M. **Avaliação e Controle Operacional de Processo de Compostagem de Resíduos Sólidos através de Método Respirométrico**. In: XV SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção, 2009, Bauru. Anais...Bauru: SIMPEP, 2009.
- AN, C. Performance of in-vessel composting of food waste in the presence of coal ash and uric acid. **J. Hazard. Mater.**, p. 38–45, 2012.
- ANDERSEN, J. K.; BOLDRIN, A.; CHRISTENSEN, T.H.; SCHEUTZ, C. Home composting as an alternative treatment option for organic household waste in Denmark: An environmental assessment using life cycle assessment-modelling. **Waste Management**, v. 32, p. 31-40, 2012.
- ANDREOTTOLA, G.; OLIVEIRA, E.L.; FOLADOR, P.; DALLAGOIV, L.; PETERLINIV, R.; CADONNAGIANNI, M. Método respirométrico para o monitoramento de processos biológicos. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.10, n.1, p. 14-23, 2005.
- ANGELL, L. C.; KLASSEN, R. D. Integrating environmental issues into the mainstream: an agenda for research in operations management. **Journal of Operations Management**, v. 17, p. 575-598, 1999.
- ALBUQUERQUE, H. C.; MARQUES, C.C.; ARAÚJO, P.G.C.; GONÇALVES, W.P.; MAIA, R.; BARBOSA, E.A. **Caracterização de resíduos sólidos orgânicos produzidos no restaurante universitário de uma instituição pública**. In: XXVII ENEGEP- Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2007, Foz do Iguaçu. Anais...ABEPRO-Associação Brasileira de Engenharia de Produção, ENEGEP, 2007.
- AMLINGER, F.; PEYR, S.; CUHLS, C. Greenhouse gas emissions from composting and mechanical biological treatment. **Waste Management and Research**, v. 26, p. 47–60, 2008.
- AQUINO, A. M.; OLIVEIRA, A. M. G.; LOUREIRO, D. C. Integrando compostagem e vermicompostagem na reciclagem de resíduos orgânicos domésticos. *Circular Técnica*, Embrapa, n, 12, 2005.
- BARREIRA, L. P. **Avaliação das usinas de compostagem do estado de São Paulo em função da qualidade dos compostos e processos de produção**. 2005. Tese (Doutorado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- BARRENA-GÓMEZ, R.; VÁZQUEZ LIMA, F.; SÁNCHEZ FERRER, A. The use of respiration indices in the composting process: a review. **Waste Management and Research**, v. 24, p. 37–47, 2006.
- BARRENA, R.; XAVIER, F.; XAVIER, G.; SÁNCHEZ, A. Home composting versus industrial composting: Influence of composting system on compost quality with focus on compost stability. **Waste Management**, article in press, 2014.

- BERNAL, M. P.; ALBUQUERQUE, J. A.; MORAL, R. Manure composting and chemical criteria for compost maturity assessment: a review. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 5444-5453, 2009.
- BERTOLDI, M.; VALLINI, G.; PERA, A. The biology of composting : a review. **Waste Management and Research**, v. 1, p. 157-176, 1983.
- BLENGINI, G. A. Using LCA to evaluate impacts and resources conservation potential of composting: a case study of the Asti District in Italy. **Resources Conservation and Recycling**, v. 52, n. 12, p. 1373–81, 2008.
- BRASIL. **Lei nº 12. 305 de 02 de agosto de 2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Brasília, Brasil, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>.
- BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Versão preliminar. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_arquivos/versao_preliminar_pnrs_wm_253.pdf>.
- CAMARGO, L.B. As dimensões e os desafios do desenvolvimento sustentável: concepções, entraves e implicações à sociedade humana. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- CHANAKYA, H. N.; RAMACHANDRA, T. V.; GURUPRASAD, M.; DEVI, D. Micro-treatment options for components of organic fraction of MSW in residential areas. **Enviromental Monitoring and Assessment**, v. 135, p. 129-139, 2007.
- CÓLON, J.; MARTINEZ-BLANCO, J.; XAVIER, G.; ARTOLA, A.; SÁNCHEZ, A.; RIERADEVALL, J.; XAVIER, F. Environmental assessment of home composting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, p. 893-904, 2010.
- DAS, K.; KEENER, H.M. Moisture effect on compaction and permeability in composts. **J. Environ. Eng.**, v.123, p. 275–281, 1997.
- DIAZ, L.F.; SAVAGE, G.M. Factors that Affect the Process. In: Diaz, L.F., de Bertoldi, M., Bidlingmaier, W. (Eds.), *Compost Science Technology*. Elsevier, Amsterdam, p. 49–64, 2007.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Uso da compostagem em sistemas agrícolas orgânicos.** Fortaleza: EMBRAPA, 2004.
- EPSTEIN, E. The science of composting. Boca Raton, FL: CRC Press, 1997.
- ERIKSSON, O.; REICH, C.; FROSTEL, M.; ASSEFA, G. Municipal solid waste management from a systems perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, p. 241- 252, 2005.
- ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA IPMET, Bauru – SP. Disponível em: <<http://www.ipmet.unesp.br/>>.
- FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. da. **Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos.** Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB), 1999.
- FU, H.; HO, Y.; SUI, Y.; LI, Z. A bibliometric analysis of solid waste research during the period 1993-2008. **Waste Management**, v. 30, n. 12, p.2410-2417, 2010.
- GAJALAKSHMI, S.; ABBASI, S. A. Solid waste management by composting: state of art. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 38, n. 5, p.311-400, 2008.
- GEA, T.; BARRENA, R.; ARTOLA, A.; SÁNCHEZ, A. Monitoring the Biological Activity of the Composting Process: Oxygen Uptake Rate(OUR), Respirometric Index (RI), and Respiratory Quotient (RQ). **Biotechnol. Bioeng**, v.88, p. 520-527, 2004.

- GETAHUN, T., NIGUSIE, A., ENTELE, T., VAN GERVEN, T., VAN DER BRUGGEN, B. Effect of turning frequencies on composting biodegradable municipal solid waste quality. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 65, p. 79-84, 2012.
- GUARDIA, A.; PETIOT C.; ROGEAU D.; DRUILHE C. Influence of aeration rate on nitrogen dynamics during composting. **Waste Management**, v.28, p. 575-587, 2008.
- GUARDIA de, A. et al. Characterization and modelling of the heat transfers in a pilot-scale reactor during composting under forced aeration. **Waste Management**, v. 32, p. 1091-1105, 2012.
- HERBETS, R. A.; COELHO, C. R. A.; MILETTI, L. C.; MENDONÇA, M. M. Compostagem de resíduos sólidos orgânicos: aspectos biotecnológicos. Departamento de Bioquímica, UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2005.
- HAUG, R.T. The Practical Handbook of Compost Engineering. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA. 1993.
- IANNOTTI, D.A., GREBUS, M.E., TOTH, B.L., MADDEN, L.V., HOITINK, H.A.J. Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste. **J. Environ. Qual.**, v. 23, p.1177–1183, 1994.
- INACIO, C. T. **Compostagem de restos de alimentos com aparas de grama e esterco de animais**: monitoramento do processo. Circular Técnica 46. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2010.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília: IPEA, 2012. p.77.
- IQBAL, M.K.; SHAFIQ, T.; AHMED, K. Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 1913–1919, 2010.
- JASMIN, S.; SMITH, S. The practicability of home composting for the management of biodegradable domestic solid waste. Centre for Environmental Control and Waste Management, Department of Civil and Environmental Engineering, London, 2003.
- KALAMDHAD, A.; PASHA M.; KAZMI A. Stability evaluation of compost by respiration techniques in a rotary drum composter. **Resources Conservation and Recycling**, 54 829-834. 2008.
- KEENER, H.M.; DICK, W.A.; HOITINK, H.A.J. Composting and beneficial utilization of composted by-product materials. In: Dick, W.A. (Ed.), Land Application of Agricultural, Industrial, and Municipal By-Products. Soil Science Society of America, Inc., Madison, p. 315–341, 2000.
- KHWAIRAKPAM, M., BHARGAVA, R. Bioconversion of filter mud using vermicomposting employing two exotic and one local earthworm species. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 5846 – 5852, 2009.
- KIEHL, E. J. Fertilizantes orgânicos. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1985.
- KIEHL, E. J. Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto, 4ªed., DeGaspari: Piracicaba, 2004.
- KLEMES, J.J.; VARBANOV, P.S.; HUISINGH, D. Recent cleaner production advances in process monitoring and optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 34, p. 1-8, 2012.
- KOPČIĆ, N.; VUKOVIĆ DOMANOVAC, M.; KUČIĆ, D.; BRISKI, F. Evaluation of laboratory-scale in-vessel co-composting of tobacco and apple waste. **Waste Management**, v. 34, p. 323-328, 2014.
- KUMAR, M.; OU, Y; LIN, J. Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. **Waste Management**, v. 30, p. 602–609, 2010.

- KUTER, G. A. **Biosolids composting**. Water Environmental Federation, Alexandria, VA, 1995.
- LASARIDI K.E.; STENTIFORD E.I. A simple respirometric technique for assessing compost stability. **Water Res.**, v. 32, p. 3717– 3723, 1998.
- LAZCANO, C.; GOMÉZ-BRANDON, M.; DOMINGUÉZ, J. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. **Chemosphere**, v. 72, p. 1013 -1019, 2008.
- LLEÓ, T.; ALBACETE, E.; BARRENA, R.; XAVIER, F.; ARTOLA, A.; SÁNCHEZ, A. Home and vermicomposting as sustainable options for biowaste management. **Journal of Cleaner Production**, v. 47, p. 70-76, 2013.
- LÓPEZ, M. et al. Intelligent composting assisted by a wireless sensing network. **Waste Management**, v. 34, p. 738-746, 2014.
- MANIOS, T. The composting potential of different organic solid wastes: experience from the island of Crete. **Environ. Int.**, v. 29, p.1079–1089, 2004.
- MARAGNO, E. S.; TROMBIN, D. F.; VIANA, E. O uso da serragem no processo de minicompostagem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4, 2007.
- MARTÍNEZ-BLANCO, J.; CÓLON, J.; XAVIER, G.; XAVIER, F.; SÁNCHEZ, A.; ARTOLA, A.; RIERADEVALL, J. The use of life cycle assessment for the comparison of biowaste composting at home and full scale. **Waste Management**, v. 30, p. 983-994, 2010.
- MARTINS, J. E.M. P.; AKUTSU, J.; KAJINO, H.S.; MANFRINATO, J.W.S.; CASTILHO, F.G.S **Desenvolvimento de um Sistema Computacional Para Automação e Gerenciamento de Processos de Compostagem de Resíduos Sólidos**. In: XVI SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção, 2009, Bauru. Anais... Bauru: SIMPEP, 2009.
- MARTINS, N. F. Modelo de composteiras orgânicas na gestão ambiental domiciliar. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental – RBGA**, v. 6, n. 1, p. 29-36, 2012.
- MASSOUD, M. ; EL-FADEL, M.; ABDEL MALAK, A. Assessment of public vs private MSW management: a case study. **Journal of Environmental Management**, v. 69, n. 1, p. 15–24, 2003.
- MASSUKADO, L. M. et al. Diagnóstico da Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil : uma análise pós PNSB 2008 - ênfase na destinação final e nos resíduos orgânicos. **Revista DAE**, n. 192, p. 22–33, 2013.
- MILLER, F.C. Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. In: Metting, F.B., Jr. (Ed.), *Soil Microbial Ecology, Applications in Agricultural and Environmental Management*. Marcel Dekker, Inc., New York, p. 515–544, 1992.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Lei nº 6.894 de 16 de dezembro de 1980, regulamentada pelo Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**, 2012.
- MORADA DA FLORESTA. Disponível em: < <http://www.moradadafloresta.org.br/>>. 2014.
- NAKASHIMA, A. T. A. et al. **Análise do índice de resto-ingestão e sobra alimentar em uma unidade de alimentação e nutrição**. In: III CONCCEPAR, 2009, Campo Mourão. Anais... Campo Mourão: CONCCEPAR, 2009.
- NEKLYUDOV, A.D.; FEDOTOV, G.N.; IVANKIN, A.N. Intensification of composting processes by aerobic microorganisms: a review. **Appl. Biochem. Microbiol.** v. 44, p. 6–18, 2008.

- NOVAES, J. P.; MASSUKADO, L. M.; LIMA, R. F. F.; ARAUJO, E. G.; COUTO, J. C. Avaliação do processo de compostagem dos resíduos sólidos orgânicos produzidos no Instituto Federal de Brasília – Campus Planaltina. In: VIII Congresso Brasileiro de Agroecologia, 2013, Porto Alegre/RS.
- OLIVEIRA, A. M. G.; AQUINO, A.M.; CASTRO NETO, M.T. Compostagem Caseira de Lixo Orgânico Doméstico. **Circular Técnica Embrapa**, n. 76, 2005.
- PARKINSON, R.; GIBBS, P.; BURCHETT, S.; MISSELBROOK, T. Effect of turning regime and seasonal weather conditions on nitrogen and phosphorus losses during aerobic composting of cattle manure. **Bioresource Technology**, v. 91, p.171–178, 2004.
- PEDROSA, T. D.; FARIAS, C.A.S.; PEREIRA, R. A.; FARIAS, E. T. R. Monitoramento dos parâmetros físicos-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 44-48, 2013.
- PEREIRA NETO, J. T. Manual de compostagem: processo de baixo custo. Belo Horizonte: UNICEF, 1996.
- PICHTEL, J. Waste management practices: municipal, hazardous, and industrial. Boca Raton: Taylor & Francis, p.649, 2005.
- PONSA S.; PAGANS E.; SANCHEZ A. Composting of dewatered wastewater sludge with various ratios of pruning waste used as a bulking agent and monitored by respirometer. **Biosystems Engineering**, v.102 (4), p. 433-443, 2009.
- PORTER, M.E.; VAN DER LINDE, C. Green and competitive: ending the stalemate. **Harvard Business Review**, v. 73, n. 5, p. 120–137, 1995.
- RASHAD, F.M., SALEH, W.D., MOSELHY, M.A. Bioconversion of rice straw and certain agro-industrial wastes to amendments for organic farming systems: 1. Composting, quality, stability and maturity indices. **Bioresource Technology**, v. 101, p.5952–5960, 2010.
- RAVI KUMAR, P; AMBIKA JAYARAM, E; SOMASHEKAR, R. K. Assessment of the performance of different compost models to manage urban household organic solid wastes. **Clean Techn Environ Policy**, v. 11, p. 473-484, 2009.
- RODRÍGUEZ, L.; CERRILLO, M.I.; GARCÍA-ALBIACH, V.; VILLASEÑOR, J. Domestic sewage sludge composting in a rotary drum reactor: Optimizing the thermophilic stage. **Journal of Environmental Management**, v. 112, p.284-291, 2012.
- RUGGIERI, L.; GEA, T.; MOMPEÓ, M.; SAYARA, T.; SÁNCHEZ, A. Performance of different systems for the composting of the source-selected organic fraction of municipal solid waste. **Biosyst Eng**, v. 101, p.78–86, 2008.
- SANTOS, J. L. D. dos. Caracterização físico-química e biológica em diferentes laboratórios de produtos obtidos a partir da compostagem de resíduos orgânicos biodegradáveis. 2007. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada)- Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2007.
- SCAGLIA, B.; ERRIQUENS, F.G.; GIGLIOTTI, G.; TACCARI M.; CIANI M.; GENEVINI, P.L.; ADANI, F. Precision determination for the specific oxygen uptake rate (SOUR) method used for biological stability evaluation of compost and biostabilized products. Università degli Studi di Milano , Università di Perugia , Università Politecnica delle Marche, Italia, 2005.
- SCOTON, E. J. **Análise dos resíduos orgânicos gerados no restaurante presente no campus da Unesp de Bauru e sua viabilidade de utilização nos processos de compostagem.** In: II WORKSHOP DO PGR EM “GESTÃO DE

- RESÍDUOS NA UNIVERSIDADE”, 2, 2012, São José do Rio Preto, SP. Resumos...São José do Rio Preto: Unesp, 2012.
- SCOTON, E. J.; BATTISTELLE, R.A.G.; BEZERRA, B. S.; AKUTSU, J. A sewage sludge co-composting process using respirometric monitoring method in hermetic rotary reactor. **Journal of Cleaner Production**. Article in press, p. 1-7, 2015.
- SHRIVASTAVA, P. Environmental technologies and competitive advantage. **Strategic Management Journal**, v.16, n. 3, p. 183–200, 1995.
- SHEN, Y. et al. Online monitoring of volatile organic compound production and emission during sewage sludge composting. **Bioresource Technology**, v. 123, p. 463-470, 2012.
- SILVA, A. G.; LEITE, V.D.; SILVA, M.M.P.; PRASAD, S.; FEITOSA, W.B.S. Compostagem aeróbia conjugada de lodo de tanque séptico e resíduos sólidos vegetais. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, p. 371-379, 2009.
- SINGH, R.P.; SINGH, P.; ARAUJO, A.S.F.; IBRAHIM, M.H.; SULAIMAN, M. Management of urban solid waste: vermicomposting as a sustainable option. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, p. 719-729, 2011.
- SMITH, P. G.; SCOTT, J. S. **Dictionary of water and waste management**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2005. p. 486.
- SOOBHANY, N.; MOHEE, R.; GARG, V. K. Experimental process monitoring and potential of *Eudrilus eugeniae* in the vermicomposting of organic solid waste in Mauritius. **Ecological Engineering**, v. 84, p. 149-158, 2015.
- SUNDBERG, C., et al. Characterisation of source-separated household waste intended for composting. **Bioresource Technology**, v.102, p. 2859–2867, 2011.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of solid waste management**. 2. ed. New York: McGraw Hill, 2002. p. 833
- VLYSSIDES, A.G.; BARAMPOUTI, E.M.P.; MAI, S.T. Physical characteristics of olive stone wooden residues: possible bulking material for composting process. **Biodegradation**, v.19, p.209–214, 2008.
- WANG, H.; WANG, C. Municipal solid waste management in Beijing: characteristics and challenges. **Waste Management and Research**, v. 31, n. 1, p. 67–72, 2013.
- YANG, L. et al. Global trends of solid waste research from 1997 to 2011 by using bibliometric analysis. **Scientometrics**, v. 96, n. 1, p. 133-146, 2012.
- YU, H., HUANG, G.H. Effects of sodium acetate as a pH control amendment on the composting of food waste. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 2005–2011, 2009.
- ZHOU, H.; SELVAM, A.; WONG, J. W.C. Evaluation of humic substances during co-composting of food waste, sawdust and Chinese medicinal herbal residues. **Bioresource Technology**, v. 168, p. 229-234, 2014.
- ZUCCONI, F.; MONACO, A.; FORTE, M.; BERTOLDI, M. Phytotoxins during the stabilization of organic matter. In: Gasser, J.K.R. (Ed.), *Composting of Agricultural and Other Wastes*. Elsevier Applied Science Publishers, Barking, p. 73-85, 1985.