

Universidade Federal do Triângulo Mineiro



PPGCTA

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental

Dissertação de Mestrado

POTENCIALIZAÇÃO DA COMPOSTAGEM COM APLICAÇÃO
DO BIOCOMPOSTO E DIMENSIONAMENTO DE PÁTIO PARA
CIDADE DE MÉDIO PORTE

Guilherme Junqueira Jerônimo

Orientador Prof. Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira

Uberaba
2019

Guilherme Junqueira Jerônimo

Potencialização da compostagem com aplicação do biocomposto e
dimensionamento de pátio para cidade de médio porte

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira.

Coorientador: Prof. Dr. Mário Sérgio da Luz.

Uberaba

2019

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

J54p Jerônimo, Guilherme Junqueira
Potencialização da compostagem com aplicação do biocomposto
e dimensionamento de pátio para cidade de médio porte / Guilherme
Junqueira Jerônimo. -- 2019.
85 f. : il., graf., tab.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) --
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2019
Orientador: Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira
Coorientador: Dr. Mário Sérgio da Luz

1. Resíduos industriais. 2. Resíduos orgânicos. 3. Resíduos sólidos – tratamento. I. Ferreira, Deusmaque Carneiro. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 628.54

GUILHERME JUNQUEIRA JERÔNIMO

POTENCIALIZAÇÃO DA COMPOSTAGEM COM APLICAÇÃO DO BIOCOMPOSTO E
DIMENSIONAMENTO DE PÁTIO PARA CIDADE DE MÉDIO PORTE

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, para obtenção do título de mestre.

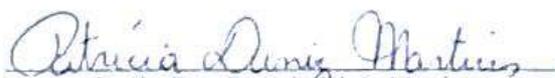
Aprovada em 23 de agosto de 2019

Banca Examinadora:



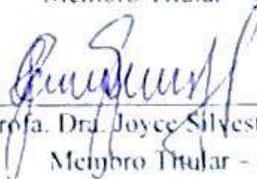
Prof. Dr. Deusmaque Carneiro Ferreira

Orientador - UFTM



Profa. Dra. Patricia Diniz Martins

Membro Titular - UFTM



Profa. Dra. Joyce Silvestre de Sousa

Membro Titular - IFTM

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, por me guiar, dar forças e me colocar nos caminhos corretos que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais: Sérgio (*in memoriam*) e Silvia, que possibilitaram eu chegar até aqui e não mediram esforços para tal. Meu muito obrigado.

Aos meus irmãos, cunhados, sobrinhos, avós, tios e primos que estiveram presentes e torceram para que isto se tornasse realidade.

Aos professores Dr. Deusmaque e ao Dr. Mário, responsáveis pela orientação e coorientação. A vocês meu muito obrigado, por todas as correções, sugestões e incentivos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental e do Departamento de Engenharia Ambiental, que direta ou indiretamente estiveram presentes na estruturação do programa e nos ensinamentos adquiridos.

À Universidade Federal do Triângulo Mineiro, ao Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas e ao Departamento de Engenharia Ambiental, que forneceram toda a infraestrutura física para a realização dos experimentos.

À Universidade Federal de Uberlândia por ter possibilitado a realização de parte dos experimentos.

Aos colaboradores da UFTM, em especial à Vanessa e a Luciana, pelo apoio no laboratório e na secretaria.

Aos meus amigos Eudes, João Paulo, Raphael e Wesley, que proporcionam momentos inesquecíveis nesses anos em Uberaba.

Ao Guto essencial na reta final para a conclusão e êxito do trabalho, meu muito obrigado.

E finalmente à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – pela bolsa de incentivo ao mestrado ofertada nesses dois anos.

“O pequeno papel de bala que você guarda no bolso, em vez de jogar no chão é prova maior do seu amor pela natureza!”

Edgrabski

RESUMO

É crescente a produção de resíduos sólidos na sociedade contemporânea. No Brasil 51,4% dos resíduos produzidos são orgânicos. A compostagem é uma possibilidade de tratamento desses resíduos, que consiste na espontânea decomposição biológica da matéria orgânica. O objetivo desse estudo foi diminuir o tempo de maturação do composto no processo de compostagem, testar os compostos produzidos e dimensionar dois pátios de compostagem (convencional e potencializado). Foram construídas 4 pilhas de compostagem (1: controle, 2: aeração facilitada, 3: aeração e fertilizante químico, e 4: fertilizante químico), para 400 kg de resíduos orgânicos industriais e 400 kg de resíduos orgânicos urbanos. Os parâmetros acompanhados foram: pH, temperatura, umidade e relação C/N. As pilhas 1 e 2 estabilizaram com 58 dias para os resíduos industriais e 56 dias para os resíduos urbanos. As pilhas 3 e 4 estabilizaram com 35 dias para ambos resíduos. Os compostos produzidos a partir dos resíduos industriais foram aplicados no cultivo de alfaces em condições naturais com 4 tratamentos (1: controle, 2: composto comercial, 3: composto das pilhas 1 e 2, 4: composto das pilhas 3 e 4). Uma segunda aplicação dos compostos em condições naturais e em estufa foi realizada acrescentando os tratamentos 5 e 6 com compostos produzidos a partir dos resíduos urbanos (5: composto das pilhas 1 e 2, 6: composto das pilhas 3 e 4). Os resultados obtidos nos tratamentos foram submetidos ao teste estatístico ANOVA. Observou-se com 95% de confiança que os tratamentos 4 e 6 (compostos com fertilizante) foram os mais eficazes no crescimento das plantas. Por fim foi dimensionado dois pátios de compostagem para um município de médio porte, um convencional com o tempo de estabilização de 90 dias que teria que possuir 6,58 ha, e um potencializado com tempo de estabilização de 35 dias com 1,69 ha. Concluiu-se que a pilha 3 é mais eficiente por possuir menor tempo de estabilização, não necessitar de revolvimento manual e produzir um composto com maior teor de nutrientes. O pátio de compostagem potencializado necessita de uma área 74,32% menor que o convencional, viabilizando assim a aplicação da compostagem para o tratamento dos resíduos orgânicos.

Palavras-chave: Resíduos Orgânicos. Resíduos industriais. Resíduos urbanos. Tratamento de Resíduos Sólidos.

ABSTRACT

The production of solid waste in contemporary society is increasing. In Brazil, 51.4% of the waste produced is organic. Composting is a possibility of treatment of these residues, which consists of the spontaneous biological decomposition of organic matter. The goal of this study was to reduce the time of maturation of the compost in the composting process, to test the compounds produced and to size two composting yards (conventional and potentiated). Four compost piles (1: control, 2: aeration facilitated, 3: aeration and chemical fertilizer, and 4: chemical fertilizer) were built for 400 kg of industrial organic waste and 400 kg of urban organic waste. The parameters followed were: pH, temperature, humidity and C / N ratio. Piles 1 and 2 stabilized with 58 days for industrial waste and 56 days for urban waste. Piles 3 and 4 stabilized with 35 days for both residues. Compounds produced from the industrial residues were applied in the culture of lettuces under natural conditions with 4 treatments (1: control, 2: commercial compound, 3: composed of piles 1 and 2, 4: composed of piles 3 and 4). A second application of the compounds under natural and greenhouse conditions was carried out by adding the treatments 5 and 6 with compounds produced from the urban waste (5: composed of piles 1 and 2, 6: composed of piles 3 and 4). The results obtained in the treatments were submitted to the ANOVA statistical test. It was observed with 95% confidence that treatments 4 and 6 (fertilizer compounds) were the most effective in plant growth. Finally, two composting yards were designed for a medium-sized municipality, a conventional one with a stabilization time of 90 days that would have to have 6.58 ha, and one with a stabilization time of 35 days with 1.69 ha. It is concluded that pile 3 is more efficient because it has a shorter stabilization time, does not require manual stirring and produces a compound with higher nutrient content. The potted composting yard needs a 74.32% smaller area than the conventional one, thus enabling the application of composting for the treatment of organic waste.

Keywords: Organic waste. Industrial waste. Urban waste. Solid Waste Treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema do processo de compostagem	4
Figura 2 - Condicionamento de uma biomassa com um agente de suporte e um agente condicionante	6
Figura 3 - Relação entre a dimensão das partículas e a atividade dos microrganismos	9
Figura 4 - Evolução da temperatura, pH e organismos durante a compostagem.....	11
Figura 5 - Curva teórica das necessidades em oxigênio durante a compostagem ...	14
Figura 6 - Localização de Uberaba	20
Figura 7 - Resíduos orgânicos industriais utilizados no experimento.....	21
Figura 8 - Tambores onde foram armazenados os resíduos.....	22
Figura 9 - Triturador de resíduos orgânicos utilizado no experimento.....	23
Figura 10 - Massa composta de resíduos, palha e esterco triturados.....	23
Figura 11 - Galhos utilizados como agentes de suporte na base das pilhas.....	24
Figura 12 - Pilhas de compostagem dos resíduos orgânicos industriais.....	25
Figura 13 - Condicionamento dos resíduos orgânicos urbanos	26
Figura 14 - Resíduos orgânicos urbanos utilizados na montagem das pilhas de compostagem.....	27
Figura 15 - As quatro pilhas de compostagem dos resíduos orgânicos urbanos	28
Figura 16 - Procedimento para a determinação do pH das pilhas.....	29
Figura 17 - Os tratamentos empregados no cultivo das alfaces: (1) controle. (2) composto comercial, (3) composto sem fertilizante químico, (4) composto com fertilizante químico	32
Figura 18 - Estufa utilizada nos experimentos de aplicação dos compostos	37
Figura 19 - Formato das leiras de compostagem	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores de temperatura na compostagem dos resíduos industriais	41
Gráfico 2 - Valores de pH na compostagem dos resíduos industriais	43
Gráfico 3 - Teores de umidade na compostagem dos resíduos industriais	44
Gráfico 4 - Relação C/N na compostagem dos resíduos industriais	45
Gráfico 5 - Valores de temperatura na compostagem dos resíduos urbanos	47
Gráfico 6 - Valores de pH na compostagem dos resíduos urbanos	48
Gráfico 7 - Teores de umidade na compostagem dos resíduos urbanos	49
Gráfico 8 - Relação C/N na compostagem dos resíduos urbanos.....	49
Gráfico 9 - Número de folhas nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais	51
Gráfico 10 - Altura média nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais	52
Gráfico 11 - Massa da matéria seca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais.....	52
Gráfico 12 - Massa da matéria fresca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais.....	52
Gráfico 13 - Número de folhas nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos.....	56
Gráfico 14 - Altura média nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos	56
Gráfico 15 - Massa da matéria fresca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos.....	57
Gráfico 16 - Massa da matéria seca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos.....	57
Gráfico 17 - Número de folhas nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos.....	60
Gráfico 18 - Altura média nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos.....	60
Gráfico 19 - Massa da matéria fresca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos.....	61
Gráfico 20 - Massa da matéria seca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fases de evolução do pH durante a compostagem	10
Quadro 2 - Parâmetros do solo utilizado no cultivo das alfaces na primeira rodada .	33
Quadro 3 - Parâmetros do composto comercial	34
Quadro 4 - Parâmetros do solo utilizado no cultivo das alfaces na segunda rodada	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa das pilhas ao final da compostagem dos resíduos industriais	46
Tabela 2 - Massa das pilhas ao final da compostagem dos resíduos urbanos	50
Tabela 3 - Resultados dos testes de ANOVA.....	53
Tabela 4 - Resultados dos testes de ANOVA sem o TR (1).....	54
Tabela 5 - Resultados dos testes de ANOVA sem o TR (1) na segunda rodada de experimentos.....	58
Tabela 6 - Resultados dos testes de ANOVA sem o TR (1) em estufa	61
Tabela 7 - Estudo gravimétrico do município de Uberaba.....	64
Tabela 8 - Parâmetros adotados para o dimensionamento.....	64
Tabela 9 - Resultados do dimensionamento do pátio convencional.....	65
Tabela 10 - Resultados do dimensionamento do pátio potencializado.....	65

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRELPE: Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais

AP: Altura média das plantas

C/N: Carbono / Nitrogênio

C: Carbono

CH₄: Metano

CO₂: Dióxido de carbono

COT: Carbono orgânico total

CTC: Compostagem termofílica contínua

g: Gramas

h: Horas

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

kg: Quilos

km: Quilômetro

MF: Massa da matéria fresca

min: Minutos

mL: Mililitros

mm: Milímetros

MS: Massa da matéria seca

N: Nitrogênio

N₂O: Óxido nitroso

NF: Número de folhas

NH₃: Amônia

NPK: Nitrogênio (% N), Fósforo (% P₂O₅) e Potássio (% K₂O)

NTK: Nitrogênio total de Kjeldahl

°C: Graus Celsius

pH: Potencial hidrogeniônico

PVC: Policloreto de vinila

RSU: Resíduos sólidos urbanos

S: Enxofre

UFTM: Universidade Federal do Triângulo Mineiro

V: Volts

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 OBJETIVO GERAL	2
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3 ESTADO DA ARTE	3
3.1 PILHA DE COMPOSTAGEM	5
3.2 MATURAÇÃO DO COMPOSTO	6
3.3 FATORES QUE AFETAM A COMPOSTAGEM	7
3.3.1 Granulometria do substrato inicial	8
3.3.2 Temperatura	9
3.3.3 pH	10
3.3.4 Organismos	11
3.3.5 Umidade	12
3.3.6 Oxigenação	13
3.3.7 Relação C/N	15
3.2 PERSPECTIVAS DE POTENCIALIZAÇÃO	15
3.2.1 Uso de microrganismos	16
3.2.2 Aeração forçada ou facilitada	16
3.2.3 Uso de fertilizantes químicos ou enzimas	17
3.2.4 Uso de outros métodos	18
4 MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1 EXPERIMENTOS DE COMPOSTAGEM	19
4.1.1 Pilhas de resíduos industriais	19
4.1.2 Pilhas de resíduos urbanos	25
4.2.3 Determinação dos parâmetros	28

4.2.3.1 Temperatura	29
4.2.3.2 pH	29
4.2.3.3 Umidade	30
4.2.3.4 Relação C/N	30
4.2 APLICAÇÃO DOS COMPOSTOS EM ALFACES	31
4.2.1 Aplicação dos compostos em condições naturais	31
4.2.2 Aplicação dos compostos em estufa	37
4.3 DIMENSIONAMENTO DO PÁTIO DE COMPOSTAGEM	38
4.3.1 Dimensionamento do pátio de compostagem convencional	38
4.3.2 Dimensionamento do pátio de compostagem potencializado	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 EXPERIMENTOS DE COMPOSTAGEM	41
5.1.2 Compostagem de resíduos industriais	41
5.1.3 Compostagem de resíduos urbanos	46
5.2 APLICAÇÃO DOS COMPOSTOS EM ALFACES	51
5.2.2 Aplicação em condições naturais	51
5.2.3 Aplicação em estufa	59
5.3 DIMENSIONAMENTO DO PÁTIO DE COMPOSTAGEM	63
5.3.1 Dimensionamento do pátio de compostagem convencional	63
5.3.1 Dimensionamento do pátio de compostagem potencializado	65
6 CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Grandes quantidades de resíduos sólidos urbanos (RSU) são produzidos na sociedade moderna e sua disposição pode causar sérios problemas ambientais, sociais e econômicos. A expansão rápida das cidades com migração maciça da população do meio rural para centros urbanos aumentou consideravelmente a produção de resíduos (AWASTHI et al., 2014). Com isso criou-se a rápida necessidade de melhoria nos sistemas de gestão, tratamento e disposição final dos RSU, para que haja mitigação nos impactos ambientais, sociais e econômicos causados.

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016), a produção de resíduos sólidos no Brasil é de 78,3 milhões de toneladas anuais o que equivale a $1,04 \text{ kg hab}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Deste total 41,6% são destinados a aterros controlados ou lixões (locais de disposição final inadequados), e 9% não são coletados e vão para terrenos baldios, córregos, rios e outros destinos irregulares.

Os RSU no Brasil possuem a seguinte composição gravimétrica: matéria orgânica (51,4%), papel, papelão e embalagens Tetra Pak (13,1%), plásticos (13,5%), vidros (2,4%), metais (2,9%) e outros (16,4%). Do total de resíduos, 31,9% são de materiais passíveis de serem reciclados, e 51,4% (matéria orgânica) é passível de virar composto orgânico agrícola (ABRELPE, 2012).

O sistema de aterro sanitário ainda é o destino final mais adequado para os RSU, mas este precisa ser associado à coleta seletiva de lixo para reciclagem e compostagem, o que permite que sua vida útil seja dilatada, diminui os impactos ambientais e os custos de implantação, operação e finalização dos aterros (PORTELLA, RIBEIRO; 2014).

O gerenciamento eficaz de resíduos sólidos orgânicos é crucial para a melhoria na gestão dos RSU. Entre os vários métodos de tratamento de resíduos orgânicos, a compostagem ganhou maior atenção devido aos baixos custos operacionais e altos benefícios sociais e ambientais (XIAO et al., 2017). A compostagem consiste na espontânea decomposição biológica da matéria orgânica proveniente dos resíduos, que é conduzida em um ambiente aeróbico. A matéria orgânica putrescível sólida ou semissólida é transformada em CO_2 , H_2O e compostos metaestáveis complexos (XIAO et al., 2017; AWASTHI et al., 2014).

Cordeiro (2010) afirma que a compostagem constitui a solução apropriada por permitir redução de custos com a deposição em aterro, bem como pelo fato de produzir um corretivo orgânico com valor para a utilização em solos com baixo teor de matéria orgânica e nutrientes, ao mesmo tempo tendo em conta a proteção da qualidade dos solos, das águas subterrâneas e superficiais, bem como da saúde humana e dos animais.

A compostagem, portanto, é um processo de decomposição e estabilização biológica dos substratos orgânicos sob condições que favorecem o desenvolvimento de temperaturas termofílicas que resultam da produção biológica de calor. Ocorre através da oxidação biológica através do qual os microrganismos decompõem os compostos constituintes dos materiais (CERRI et al., 2008).

Apesar de diversas vantagens sociais, econômicas e ambientais ainda há dificuldades de se aplicar o processo de compostagem em larga escala, principalmente devido à falta de segregação na fonte e também por conta da demora na maturação do composto, que encarece o processo e faz demandar grandes áreas para os pátios de compostagem.

Além disso há outras dificuldades como a eliminação total de microrganismos patogênicos do composto final, a excessiva emissão de gases causadores de efeito estufa durante o processo, a concentração algumas vezes insuficiente de macronutrientes no composto final e seu potencial de fitotoxicidade.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Diminuir o tempo de maturação do composto no processo de compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos oriundos de duas fontes (industriais e urbanos), testar o composto em cultura de alface (*Lactuca sativa L.*) e dimensionar o pátio de compostagem para uma cidade de médio porte.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar qual das 4 pilhas de compostagem para a fração orgânica dos resíduos oriundos de duas fontes: industriais e urbanos, é a mais eficaz na estabilização e na qualidade do composto.
- Analisar a maturação do composto a partir dos parâmetros de umidade, temperatura, pH e relação C/N das pilhas.
- Testar a qualidade dos compostos obtidos na cultura de alface (*Lactuca sativa L.*), em condições naturais e em estufa.
- Dimensionar dois tipos de pátios de compostagem: um com o processo de compostagem convencional e outro com o processo de compostagem potencializado.

3 ESTADO DA ARTE

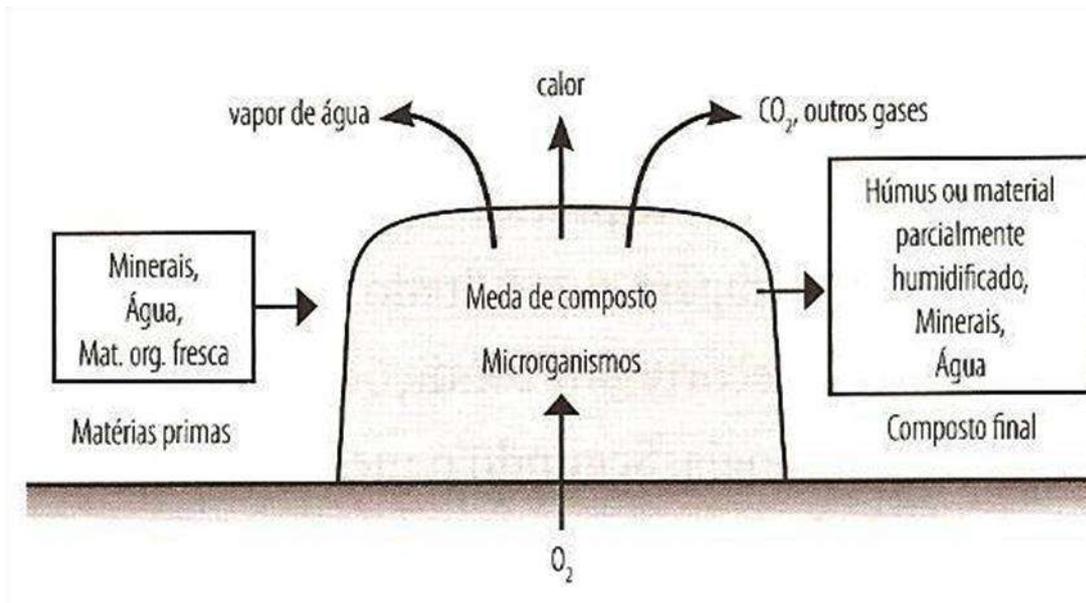
O processo de compostagem tem como intuito estabilizar os resíduos orgânicos em compostos utilizáveis na agricultura para correção e melhoria da qualidade dos solos, favorecendo assim o crescimento das espécies vegetais ali cultivadas (CUNHA QUEDA, 1999).

Zucconi & De Bertoldi (1987) definem compostagem como sendo um processo bioxidante controlado de substratos orgânicos, no qual ocorre uma fase termófila e a libertação temporária de fitotoxinas, e do qual resultam dióxido de carbono, vapor de água, elementos minerais e matéria orgânica estabilizada.

Cunha Queda (1999) define compostagem como um processo aeróbio controlado de bioxidação de substratos heterogêneos biodegradáveis, resultante da ação dos microrganismos (bactérias, actinomicetas e fungos) naturalmente associados aos substratos. Durante o processo ocorre uma fase termófila, a liberação de substâncias com efeito fitotóxico, no qual as biomassas sofrem profundas transformações (mineralização e humificação parciais). O principal produto final, designado composto, deve ser homogêneo, higienizado e cuja aplicação no solo não tenha efeitos adversos para o ambiente.

Na Figura 1 encontra-se esquematizado, de uma forma geral e simplificada, o processo de compostagem.

Figura 1 - Esquema do processo de compostagem



Fonte: Batista & Batista, 2007

Os materiais utilizados para a compostagem podem ser divididos em duas classes segundo Cerri et al. (2008), a dos materiais ricos em carbono e a dos materiais ricos em nitrogênio. Entre os materiais ricos em carbono podemos considerar os materiais lenhosos como a casca de árvores, as aparas de madeira, as podas dos jardins, folhas e galhos das árvores, palhas e fenos, e papel. Entre os materiais nitrogenados incluem-se as folhas verdes, estrumes de animais, urinas, solo, restos de vegetais hortícolas, erva, etc.

Cerri et al. (2008) ainda afirmam que os materiais para compostagem não devem conter vidros, plásticos, tintas, óleos, metais, pedras etc. Não devem conter um excesso de gorduras (porque podem libertar ácidos graxos de cadeia curta como o acético, o propiónico e o butírico os quais retardam a compostagem e prejudicam o composto), ossos inteiros (os ossos só se devem utilizar se forem moídos), ou outras substâncias que prejudiquem o processo de compostagem. A carne deve ser evitada nas pilhas de compostagem porque pode atrair animais. O papel pode ser utilizado, mas não deve exceder 10% da pilha. O papel encerado e o colorido devem ser evitados por ser de difícil decomposição e por conter metais pesados, respectivamente.

Merkel (1981) divide o processo de compostagem em duas etapas principais, a fase ativa, que é caracterizada pela rápida e intensa biotransformação aeróbia e por

temperaturas elevadas, já que as reações de degradação são muito intensas, ocorrendo a libertação de calor, CO₂ e vapor de água. E a fase de acabamento (*curing*), que se segue à fase ativa e é caracterizada como sendo uma fase lenta e de progressiva diminuição da temperatura. Durante esta fase a biomassa em compostagem perde a fitotoxicidade residual, a população microbiana atinge um equilíbrio dinâmico e ocorre a síntese de substâncias húmicas.

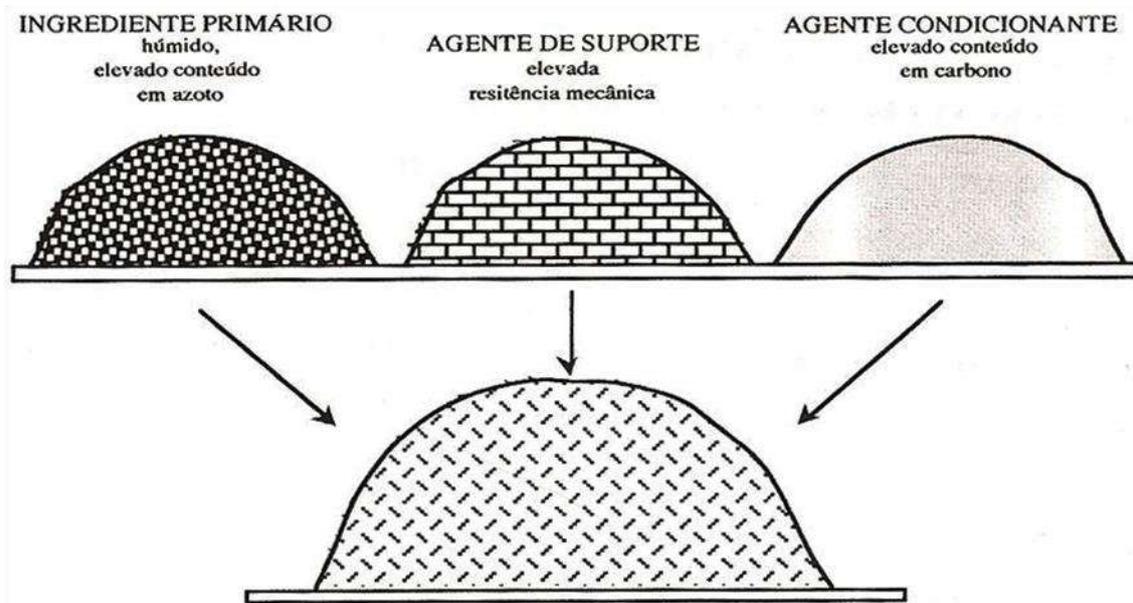
Cordeiro (2010) diz que após as fases supracitadas ainda pode ser necessário o afinamento do composto, quando esses são provenientes de resíduos sólidos urbanos, essa fase final consiste num pós-processamento, no qual se realiza um tratamento mecânico, que tem por finalidade melhorar as características granulométricas e remover contaminantes inertes que não foram eliminados nas etapas anteriores.

3.1 PILHA DE COMPOSTAGEM

Na construção de uma pilha de compostagem é frequente utilizar uma mistura de materiais ricos em carbono com outros ricos em nitrogênio. Os materiais ricos em carbono (agentes condicionantes) fornecem a matéria orgânica e a energia para a compostagem e os materiais nitrogenados (ingredientes primários) aceleram o processo de compostagem, porque o nitrogênio é necessário para o crescimento dos microrganismos (CERRI et al., 2008).

Depois de realizada a mistura dos substratos iniciais procede-se ao condicionamento do material que, segundo Cordeiro (2010), nesta etapa pode ser realizada a mistura de agentes de suporte que têm por função principal assegurar a boa estrutura da mistura. São agentes de suporte estilhas de madeira, cascas de árvore ou outros resíduos florestais e de jardins que apresentam uma elevada resistência mecânica, e depois de triturados têm como finalidade aumentar a porosidade da mistura. A Figura 2 mostra o condicionamento da biomassa com um agente de suporte e um agente condicionante.

Figura 2 - Condicionamento de uma biomassa com um agente de suporte e um agente condicionante



Fonte: Vallini, 1995

Cerri et al. (2008) afirmam que durante a montagem das pilhas deve-se prever um espaço para revolvimento do composto (de mesma largura da pilha, aproximadamente 2 metros) ao lado delas. Deve-se também construir valas de escoamento para águas de chuva ao redor das pilhas. A construção das pilhas deve ser realizada distribuindo-se uniformemente os ingredientes primários intercalados com os agentes condicionantes, até atingir uma altura entre 1,5 a 1,8 metro.

Alturas inferiores a 1,5 metro não são recomendadas, por não apresentarem um volume suficiente para manter uma temperatura adequada. Do mesmo modo, alturas superiores a 1,8 metros não devem ser adotadas, pois acumulam muito peso, provocando compactação e, conseqüentemente, comprometendo a aeração (CERRI et al., 2008).

3.2 MATURAÇÃO DO COMPOSTO

O tempo necessário para transformar em composto uma biomassa sujeita a uma bioestabilização aeróbia depende de muitos fatores, como as características da matriz orgânica de partida, a temperatura, a umidade, o tipo de oxigenação e a dimensão da pilha (CUNHA QUEDA, 1999).

Segundo Vallini (1995), se tivermos um adequado teor de umidade (60-65%), uma relação C/N aproximadamente de 25:1, e uma eficaz oxigenação da biomassa, podemos realizar o processo de compostagem em algumas semanas. As condições que podem tornar um processo de compostagem mais longo estão relacionadas com erros operacionais, ou quando os fatores que influenciam o processo estão fora do ideal, como será discutido no item 3.3.

A maturidade do composto ocorre quando a decomposição microbiológica se completa e a matéria orgânica é transformada em húmus. Esse produto final da decomposição (húmus) é comumente utilizado para fins agrícolas, devendo possuir características físicas e químicas que facilitem o seu uso como fertilizante e/ou condicionador de solos, não podendo conter contaminação com metais pesados ou patógenos, uma vez que, havendo tais contaminantes, somente poderá ser empregado na adubação de plantas ornamentais e flores (KIEHL, 1998).

A maturação do adubo está diretamente relacionada com a proporção de substâncias húmicas (ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina). A quantificação das frações é um indicador do grau de maturação do composto e por isso da sua qualidade. As substâncias húmicas informam sobre os processos que regulam ou determinam os benefícios que o fertilizante promoverá no solo e nas plantas (DIAS, 2005).

O composto estará curado, ou seja, pronto para o uso cerca de 90 a 120 dias após o início das operações. O composto curado (humificado) apresenta coloração escura, cheiro de bolor e consistência amanteigada, quando molhado e esfregado nas mãos. O produto final deverá ter no máximo 25% de umidade, pH superior a 6,0 e a relação C/N na faixa de 10:1 a 15:1 (CERRI et al., 2008).

3.3 FATORES QUE AFETAM A COMPOSTAGEM

Segundo Cunha Queda (1999), os principais fatores que influenciam o processo de compostagem são os que afetam, direta ou indiretamente o metabolismo dos microrganismos que são responsáveis pela decomposição dos resíduos e sua transformação num produto estável e rico em substâncias húmicas – o composto. O controle e a potencialização dos parâmetros operacionais têm, assim, como objetivo principal proporcionar as condições ótimas para o desenvolvimento dos

microrganismos, e deverão ser consideradas desde logo na etapa de condicionamento dos materiais.

De acordo com Russo (2004), além dos fatores ambientais, também é preciso nutrientes balanceados, expressos pela relação C/N, em quantidades adequadas para que os microrganismos possam exercer a sua atividade. Outro fator que afeta o processo é de ordem operacional, o tamanho das partículas, ou seja, a granulometria influencia o arejamento e a estabilidade geométrica das pilhas ou leiras.

3.3.1 Granulometria do substrato inicial

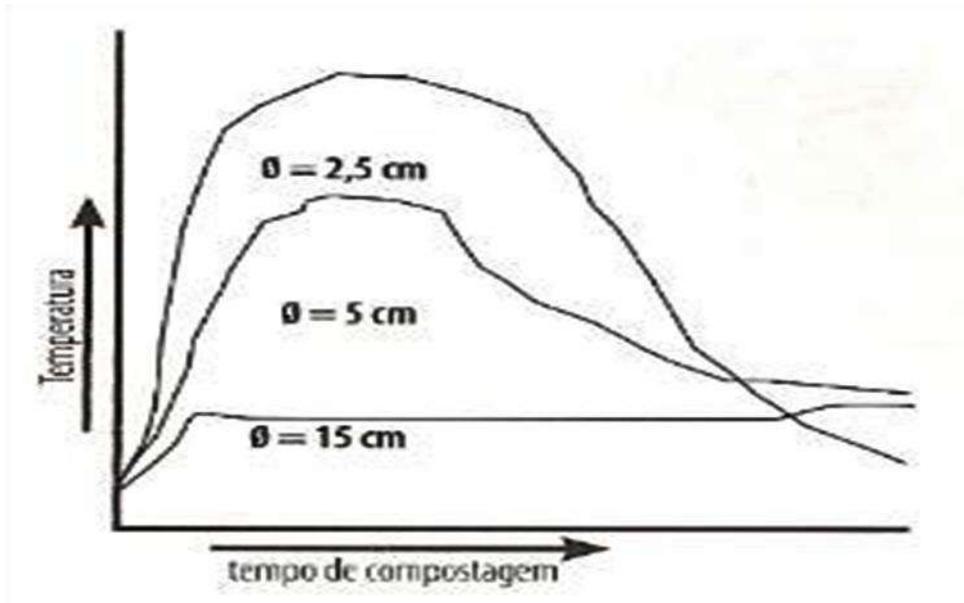
É frequente nos processos de compostagem o uso de fragmentação dos materiais com vista à obtenção de uma granulometria mais adequada, quer ao ataque microbiano quer à manutenção das condições ideais para a oxigenação.

Segundo Cerri et al. (2008) o processo de decomposição inicia-se junto à superfície das partículas, onde exista oxigênio difundido na película de água que as cobre, e onde o substrato seja acessível aos microrganismos e às suas enzimas extracelulares. Como as partículas pequenas têm uma superfície específica maior estas serão decompostas mais rapidamente desde que exista arejamento adequado.

As partículas devem ter entre 1,3 cm e 7,6 cm. Abaixo deste tamanho seria necessário utilizar sistemas de ar forçado enquanto que os valores superiores podem ser bons para pilhas mais estáticas e sem arejamento forçado. O ideal é que os materiais utilizados na compostagem não tenham dimensões superiores a 3 cm de diâmetro. Quanto menor for o tamanho das partículas, maior é a sua superfície específica, e, portanto, mais fácil é o ataque microbiano ou a disponibilidade biológica das partículas, mas, em contrapartida, aumentam os riscos de compactação e de falta de oxigênio (BRITO, 2005).

A Figura 3 indica de que forma a dimensão das partículas interfere com a atividade dos microrganismos e com o tempo de compostagem.

Figura 3 - Relação entre a dimensão das partículas e a atividade dos microrganismos



Fonte: Batista & Batista, 2007

3.3.2 Temperatura

De uma maneira geral Cerri et al. (2008) cita que quando a matéria orgânica é decomposta o calor criado pelo metabolismo dos microrganismos se dissipa e o material, normalmente, não se aquece. Todavia, na compostagem de resíduos orgânicos, em pilhas, ou em condições controladas, trabalhando-se com grandes massas, o calor desenvolvido se acumula e a temperatura alcança valores elevados, podendo chegar à cerca de 80 °C.

De acordo com Kiehl (1998), no processo de compostagem, a atividade microbiológica atinge alta intensidade, provocando a elevação da temperatura no interior das pilhas, chegando a valores de até 65°C, ou mesmo superiores, em decorrência da geração de calor pelo metabolismo microbiológico de oxidação da matéria orgânica que é exotérmico.

Cunha Queda (1999) afirma que a evolução da temperatura no processo de compostagem é caracterizada pela existência de três fases: fase mesófila inicial, fase termófila e fase mesófila final (resfriamento gradual). A fase mesófila inicial e a fase termófila correspondem à fase ativa do processo e a fase mesófila final à fase de acabamento (Figura 4).

A duração e a evolução de cada uma destas fases dependem das características físicas, físico-químicas e químicas da matriz inicial, do método de compostagem utilizado e do controle dos parâmetros operacionais ao longo do processo (Cunha Queda, 1999).

Altas temperaturas são necessárias para uma boa compostagem, para eliminação de sementes de ervas infestantes e microrganismos patogênicos. No entanto, há limites a controlar, porque uma temperatura excessiva (80°C) por longos períodos é prejudicial ao processo devido à inibição do crescimento e mesmo à morte de microrganismos não termotolerantes, reduzindo deste modo a taxa de decomposição (Russo, 2004).

3.3.3 pH

O processo de compostagem é relativamente pouco sensível ao pH dos substratos de partida, devido ao largo espectro de microrganismos associados às biomassas e que estão envolvidos no processo. Os valores ótimos situam-se no intervalo entre 6,5 e 8, no entanto, dada a natural capacidade tampão do processo este permite a utilização de biomassas em intervalos de pH mais amplos. De fato, a compostagem pode ser realizada com biomassas com valores de pH de 5,5 a 9 (Vallini, 1995).

O Quadro 1 relaciona as fases de evolução do pH durante o processo de compostagem. Na Figura 4 está esquematizado a evolução do pH durante o processo de compostagem.

Quadro 1 - Fases de evolução do pH durante a compostagem

Fase	Característica principal	Explicação
I	Valor de pH diminui	É uma fase de acidificação, ocorrendo a produção intensa de CO ₂ e de ácidos orgânicos, predominando os microrganismos mesófilos.
II	pH aumenta	Devido à produção de nitrogênio na forma amoniacal proveniente da hidrólise do nitrogênio orgânico, é uma fase de

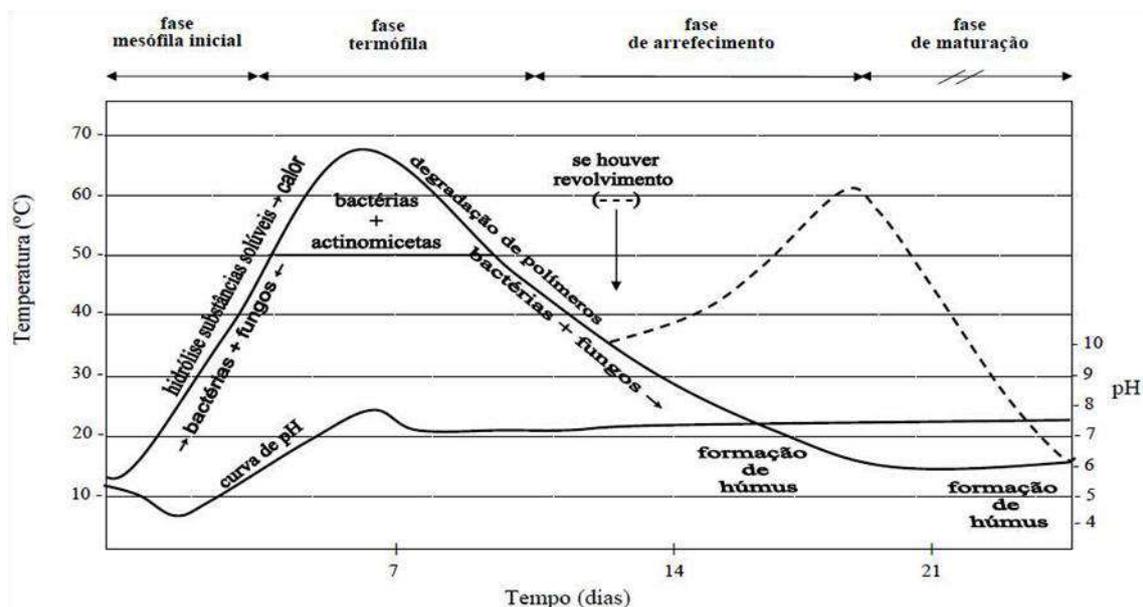
		alcalinização onde predominam os microrganismos termófilos.
III	Início da estabilização do pH	O amoníaco produzido na fase anterior diminui quer devido à sua volatilização ou quer por ação das bactérias nitrificantes que o oxidam da forma amoniacal à forma de nitrito e, posteriormente, à nitrato.
IV	pH tende para a neutralidade	Esta estabilização do pH deve-se às reações de maturação e ao poder tampão do húmus

Fonte: Adaptado de Mustin, 1987

3.3.4 Organismos

Segundo (CUNHA QUEDA, 1999) a transformação da matéria orgânica biodegradável através da compostagem decorre em fases consecutivas, caracterizadas pela intervenção de diferentes grupos de microrganismos que se sucedem em função da alteração das condições físicas, físico-químicas, químicas e biológicas, que favorecem a predominância de um ou mais grupos em detrimento de outros e que também são, por sua vez, resultantes do metabolismo microbiano (Figura 4).

Figura 4 - Evolução da temperatura, pH e organismos durante a compostagem



Fonte: Lopéz-Real, 1995

A transformação da matéria orgânica é resultante da ação combinada da macro e mesofauna (minhocas, formigas, besouros e acáros) e de diferentes comunidades de microrganismos (incluindo bactérias, actinomicetas, leveduras e fungos) que predominam em diferentes fases da compostagem. Inicialmente, atuam microrganismos que metabolizam o nitrogênio orgânico transformando-o em nitrogênio amoniacal e com o decorrer da decomposição, a amônia pode ser perdida por volatilização ou convertida à forma de nitratos, pela nitrificação (CERRI et al., 2008).

Segundo Cerri et al. (2008) no processo de compostagem a energia produzida pelos microrganismos promove um incremento de temperaturas. Quando essas encontram-se superiores a 40°C começam a predominar os microrganismos termofílicos, responsáveis pela decomposição acelerada da matéria orgânica. Nessa fase as temperaturas ultrapassam os 55°C, promovendo a eliminação dos microrganismos patogênicos para os humanos ou para as plantas.

3.3.5 Umidade

Durante a compostagem o teor em água pode variar por duas razões. A primeira relaciona-se com o fato de que os microrganismos aeróbios produzem água quando decompõem a matéria orgânica, o que contribui para aumentar a umidade do composto. A água produzida pelo metabolismo dos microrganismos é distinta da água que faz parte da composição dos materiais iniciais e é designada por água metabólica. A segunda razão tem a ver com as perdas, sob a forma de vapor de água, que se verificam através da ação conjugada do aumento de temperatura, da ventilação ou do revolvimento do composto (Batista & Batista, 2007).

A faixa de umidade ótima para se obter um máximo de decomposição está entre 40 a 60%, principalmente durante a fase inicial, pois é necessário que exista um adequado suprimento de água para promover o crescimento dos organismos biológicos envolvidos no processo e para que as reações bioquímicas ocorram adequadamente durante a compostagem (MERKEL, 1981).

Segundo Vallini (1995), as pilhas de compostagem deverão ter teores de umidade compreendidos entre 45% e 65%. Para teores de umidades inferiores a 40%, a atividade microbiana decresce, e para valores superiores a 65% a água expelle o ar

da maior parte dos interstícios existentes entre as partículas da biomassa, o que dificulta a difusão do oxigênio e pode originar condições de microaerofília ou mesmo de anaerobiose.

Durante todo o processo de compostagem a umidade deve ser mantida dentro dos limites ótimos para a ocorrência das reações biológicas, já que a excessiva desidratação da biomassa em compostagem, com o conseqüente declínio da atividade microbiana, pode ser interpretada erradamente como tendo sido alcançada a estabilização dos materiais (Vallini, 1995).

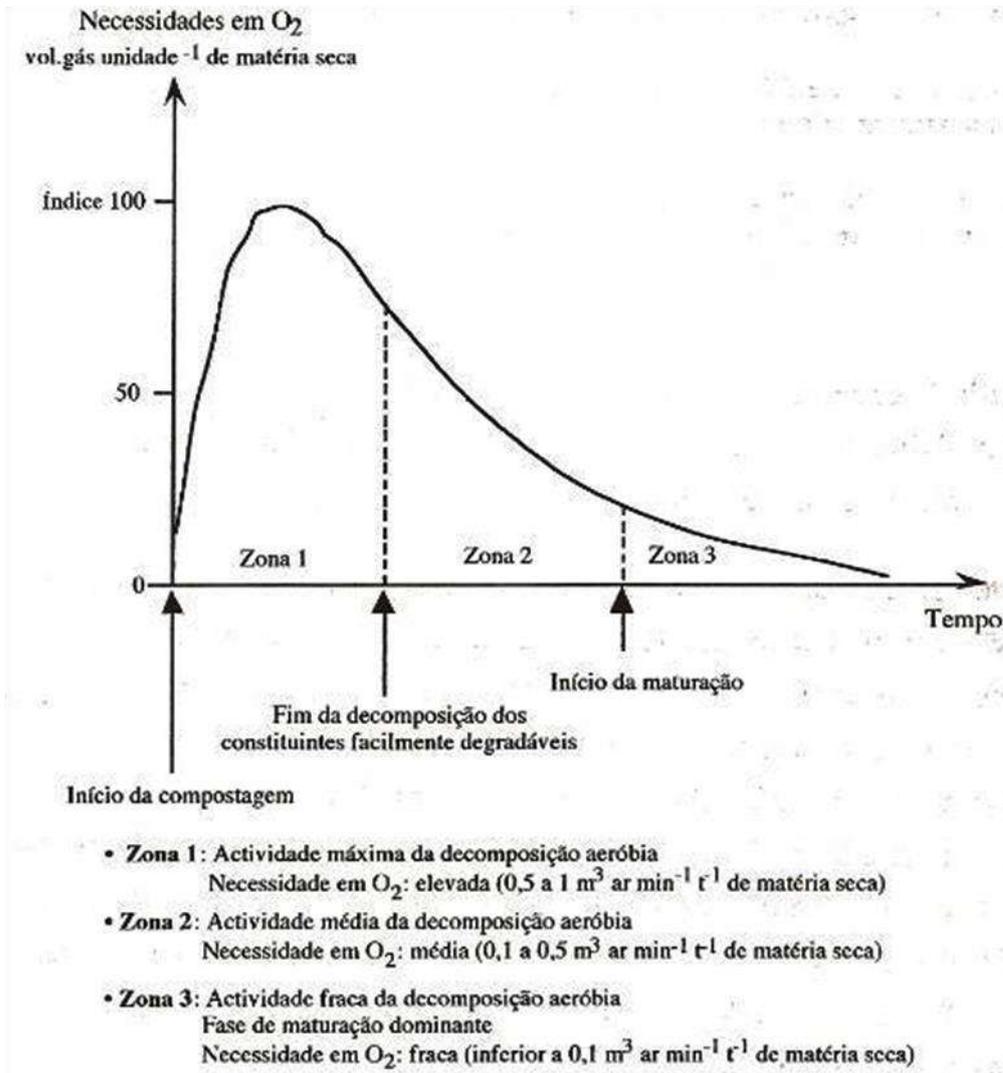
3.3.6 Oxigenação

Cerri et al. (2008) diz que o oxigênio é de vital importância para a oxidação biológica do carbono dos resíduos orgânicos, para que ocorra produção de energia necessária aos microrganismos que realizam a decomposição. Parte dessa energia é utilizada no metabolismo dos microrganismos e o restante é liberado na forma de calor.

Uma compostagem sem o controle adequado pode levar a oxidação anaeróbia, acompanhada de putrefação e mau cheiro eliminado na atmosfera, na forma de gás ácido sulfídrico e mercaptanas (dimetildissulfeto, dimetilsulfeto, metilmercaptanas) e outros produtos contendo enxofre, todos com cheiro de “ovo podre” (KIEHL, 1998). Segundo o mesmo autor, o processo aeróbio é caracterizado pela alta temperatura desenvolvida no composto, pelo menor tempo de degradação da matéria orgânica e pelas reações de oxidação e oxigenação que se dão no processo, conduzindo o substrato a ter no final um pH próximo de 7,0. O odor desagradável pode ser reduzido por revolvimento da leira, ou por outro meio de aeração, transformando o processo de anaeróbio para aeróbio.

De acordo com Mustin (1987), o consumo de oxigênio verificado numa biomassa em compostagem é, portanto, um parâmetro diretamente relacionado com a atividade dos microrganismos aeróbios. Na figura 5 é apresentada uma curva teórica das necessidades de oxigênio ao longo da compostagem.

Figura 5 - Curva teórica das necessidades em oxigênio durante a compostagem



Fonte: Mustin, 1987

Conforme pode-se observar na Figura 5, nos primeiros dias os substratos mais facilmente degradáveis presentes na biomassa são rapidamente metabolizados; assim, as necessidades de oxigênio, bem como a produção de calor, são maiores na fase ativa da compostagem, diminuindo na fase seguinte. O processo pode decorrer com uma concentração mínima de 5% de O₂ na atmosfera circundante das partículas da biomassa, e para que tenhamos as condições ótimas para o processo é requerido que esta concentração não seja inferior a 10% (Vallini, 1995).

Cerri et al. (2008) ainda acrescenta que na prática da compostagem, a aeração é o fator mais importante a ser considerado, sendo que quanto mais úmidas estiverem as matérias-primas mais deficientes será sua oxigenação, determinando que

providências sejam tomadas para reduzir a umidade. No pátio de compostagem a aeração pode ser realizada por revolvimento das leiras, ou por insuflação ou aspiração do ar contido nos vazios da massa.

3.3.7 Relação C/N

Vallini (1995) refere que em geral os microrganismos utilizam para as suas reações energéticas e de crescimento, o carbono, numa quantidade vinte vezes superior à do nitrogênio. Segundo o mesmo autor, para a compostagem o intervalo ótimo para a relação C/N deve estar compreendido entre 25:1 e 30:1 e o intervalo de compatibilidade (susceptível de ser utilizado) entre 20:1 e 40:1. Com valores inferiores a 20:1, o carbono disponível é completamente utilizado sem que haja a estabilização completa do nitrogênio.

O excesso de nitrogênio pode ser perdido para a atmosfera na forma de amoníaco, especialmente para valores de pH e temperatura elevados, o que causa odores indesejáveis. Se os substratos tiverem C/N superiores a 40:1, requerem tempo de compostagem longo, já que os microrganismos terão que oxidar o excesso de carbono até que a relação C/N seja mais propícia ao seu metabolismo (Vallini, 1995).

Segundo Kiehl (1998), o acompanhamento da relação C/N durante a compostagem permite conhecer o andamento do processo, pois quando o composto atinge a semicura, ou bioestabilização, a relação C/N se situa em torno de 18:1, e quando atinge a maturidade, ou seja, transformou-se em produto humificado, a relação C/N se situa em torno de 10:1.

3.2 PERSPECTIVAS DE POTENCIALIZAÇÃO

A seguir são apresentados estudos já realizados que buscam a potencialização do processo de compostagem de resíduos sólidos orgânicos. Os estudos partem de diversos pontos como: diminuição do tempo para maturação, eliminação mais eficaz de microrganismos patogênicos, controle das emissões de gases de efeito estufa, aumento da concentração de macronutrientes no composto final, diminuição da sua fitotoxicidade e diminuição do uso de mão-de-obra durante o processo.

3.2.1 Uso de microrganismos

Para a diminuição do tempo necessário para a maturação do composto, eliminar as bactérias patogênicas e gerar um composto rico em nutrientes, uma das técnicas viáveis que tem se mostrado promissora é a inoculação de microrganismos no processo. Muscope (2017) utilizou a inoculação de microrganismos eficientes na compostagem. O experimento por ele conduzido foi realizado em campo, utilizando três leiras iguais. Foram utilizadas três concentrações de microrganismos eficientes inoculadas no início da compostagem, de 0, 2 e 4 mL. L⁻¹ para as leiras 1, 2 e 3 respectivamente.

Nesse estudo a quantidade de macronutrientes aumentou com o processo de compostagem para as três leiras estudadas, as relações C/N ao final do processo ficaram 11,62:1, 12,33:1 e 11,51:1 para as leiras 1, 2 e 3 respectivamente. Não foi detectado *Salmonella spp* inicial e as quantidades de coliformes diminuíram para as três leiras, ficaram em 14000, 17000 e 400 NMP.g⁻¹. A utilização de microrganismos eficientes em concentração de 4 mL L⁻¹ acabou apresentando os melhores resultados (MUSCOPE, 2017).

De maneira análoga, Awasthi et al. (2014) analisaram a influência do uso de um consórcio de fungos na compostagem de RSU para produzir composto com maior teor de nutrientes. Quatro pilhas de configurações diferentes foram preparadas: três pilhas foram inoculadas com consórcio fúngico (*Trichoderma viride*, *Aspergillus niger* e *Aspergillus flavus*) com uma frequência de revolvimento semanal (pilha 1), duas vezes por semana (pilha 2) e diariamente (pilha 3), e a pilha 4 (controle) com revolvimento semanal não possuiu inoculação fúngica.

Como resultado do experimento a pilha com consórcio de fungos e revolvimento semanal (pilha 1) foi considerada a melhor configuração. Esta pilha teve uma alta degradação de matéria orgânica e maturação precoce, quando comparada às outras pilhas (AWASTHI et. al., 2014).

3.2.2 Aeração forçada ou facilitada

O uso da aeração forçada ou facilitada é uma técnica que na compostagem visa diminuir o tempo de maturação do compostagem fornecendo oxigênio para que a atividade microbiana seja ótima, e para além disso também visa diminuir o uso de

mão-de-obra durante o processo já que descarta a necessidade de revolvimento manual (CORDEIRO, 2010).

Entretanto, alguns autores têm encontrado outras vantagens no controle da oxigenação durante a compostagem, como por exemplo no controle de emissões gasosas de poluentes.

Jiang et. al. (2011) conduziu um experimento para estimar os efeitos da relação C/N, taxa de aeração, umidade inicial no teor de emissões gasosas durante a compostagem de fezes de suínos. Os resultados mostraram que cerca de 23,9% a 45,6% do carbono orgânico total (COT) foi perdido na forma de CO₂ e de 0,8% a 7,5% de COT foi emitido como CH₄. A maior parte do nitrogênio foi perdido na forma de NH₃, que representa 9,6% a 32,4% do nitrogênio inicial. O N₂O também foi um importante meio de perdas de nitrogênio e 1,5% a 7,3% do nitrogênio total inicial.

A análise estatística mostrou que a taxa de aeração é o fator mais importante que afeta significativamente as emissões de NH₃, CH₄ e N₂O. Este estudo mostrou ainda que taxas de aeração mais altas reduzem emissão de CH₄, mas aumentam as perdas de NH₃ e N₂O. A relação C/N pode afetar as emissões de NH₃ e CH₄ significativamente, mas não o N₂O. A menor relação C/N implicou em maiores emissões de NH₃ e CH₄. O teor de umidade inicial não influencia a emissão gasosa significativamente (JIANG et. al., 2011).

3.2.3 Uso de fertilizantes químicos ou enzimas

Para aumentar o teor de nutrientes do composto final e diminuir seu tempo para maturação o uso de fertilizantes químicos ou enzimas tem se mostrado promissor pois acelera a ação dos microrganismos.

Pereira & Fialho (2013) estudaram os aspectos inerentes à utilização de enzimas na compostagem acelerada de resíduos sólidos orgânicos decorrentes dos resíduos urbanos, transformando-os em um fertilizante com características organominerais. O procedimento metodológico empregado consistiu na transformação acelerada por ação enzimática dos resíduos orgânicos gerados. Após a compostagem com a utilização de enzimas o resultado foi um produto final estável, livre de microrganismos patogênicos contendo uma equilibrada concentração de nutrientes.

O tempo de compostagem se mostrou significativamente reduzido, denotando uma substancial ação biocatalisadora dos complexos enzimáticos utilizados na biodegradação dos resíduos. Os resultados para os ensaios biológicos evidenciaram as diferenças de antes e depois do experimento mostrando o aumento bacteriano biodecompositor em curto espaço de tempo, assim como a drástica redução de contaminantes (PEREIRA & FIALHO, 2013).

Seguindo perspectiva parecida, Benites et al. (2010) afirmam que no Brasil é comum a utilização de cama-de-aviário e de dejetos líquidos de suínos como fonte de nutrientes para o cultivo de grãos e de pastagens. No entanto, o uso de resíduos animais in natura resulta em baixa eficiência de utilização dos nutrientes, perdas por lixiviação e volatilização, e aumenta o risco de contaminação ambiental.

Após a transformação biológica dos resíduos animais pelo processo de compostagem e sua associação com fontes minerais é possível produzir fertilizantes organominerais granulados com alto teor de fósforo solúvel. As características físicas e químicas do fertilizante organomineral granulado está de acordo com a lei brasileira de fertilizantes. Este estudo indica que a eficiência do uso do fósforo proveniente dos fertilizantes organominerais é semelhante à eficiência dos fertilizantes solúveis (BENITES et. al., 2010).

3.2.4 Uso de outros métodos

Xiao et al. (2017) fizeram um estudo de revisão investigando o efeito da aplicação de biochar (biomassa carbonizada ou biocarvão) no processo de compostagem. Segundo este estudo a adição de biochar na compostagem pode: (1) melhorar as propriedades físico-químicas do composto, (2) melhorar as atividades microbianas e promover a decomposição da matéria orgânica, (3) reduzir as emissões de amônia e metano, e (4) melhorar a qualidade do composto, aumentando o conteúdo total e disponível de nutrientes, aumentando a maturidade e diminuindo a sua fitotoxicidade.

Xiao et al. (2009) estudaram um método de compostagem termofílica contínua (CTC), com apenas uma fase termofílica no processo, que foram aplicadas a quatro pilhas de compostagem, e ainda comparado a uma pilha de compostagem convencional avaliando os índices de pH, COT, Nitrogênio total de Kjeldahl (NTK), relação C/N, índice de germinação (GI) e taxa específica de consumo de oxigênio.

Após a compostagem por 14, 16, 18 e 19 dias nas quatro pilhas com CTC, respectivamente, houve a maturação com qualidade semelhante ou melhor do que na pilha sem CTC que se estabilizou com 28 dias. Este estudo sugere a CTC como um novo método para a rápida degradação e maturação de resíduos sólidos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 EXPERIMENTOS DE COMPOSTAGEM

A metodologia para os experimentos de compostagem foi baseada e adaptada de Cordeiro (2010) e Silva (2016). Os experimentos aqui realizados utilizaram as seguintes técnicas de potencialização: aeração facilitada (diminui mão-de-obra), inoculação de microrganismos (diminui o tempo de maturação) e o acréscimo de fertilizantes químicos (diminui o tempo de maturação e aumenta o teor de nutrientes do composto final).

O uso de aeração facilitada foi escolhido em detrimento da aeração forçada por esta demandar gastos com equipamentos e energia elétrica. O uso de fertilizantes químicos foi adotado pela facilidade de encontrar esse produto no Brasil, também para acelerar o processo e agregar nutrientes importantes no composto final (organomineral). A inoculação de microrganismos (através da aplicação de esterco bovino) foi utilizada para povoar as pilhas com microrganismos e dar uma partida mais rápida ao processo de degradação (LOUREIRO, et al., 2007).

Os experimentos foram conduzidos utilizando resíduos orgânicos de duas fontes: industrial e urbana.

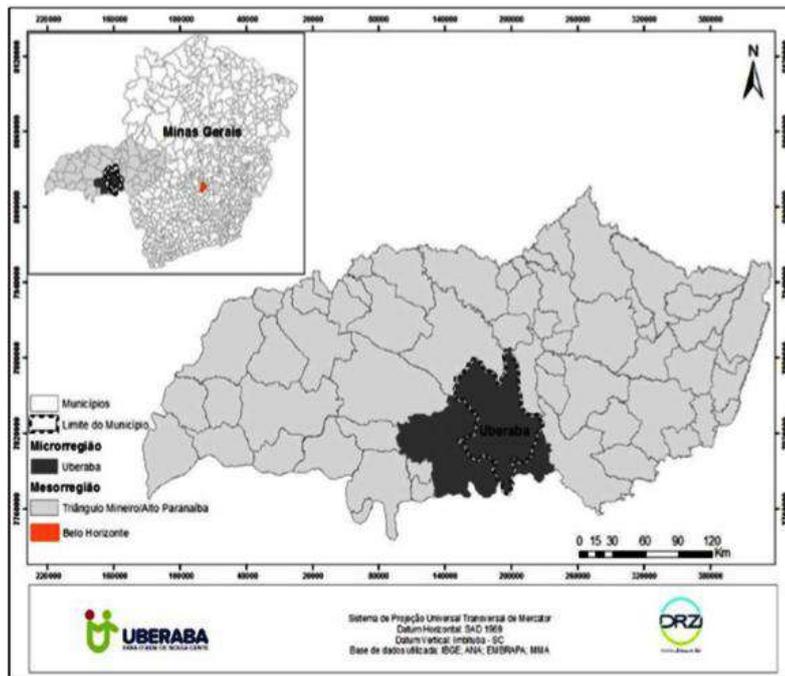
4.1.1 Pilhas de resíduos industriais

Neste estudo o processo de compostagem dos resíduos sólidos industriais foi realizado no município de Uberaba (Minas Gerais), no campus Univerdecidade da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) no período entre 25 de janeiro a 18 de abril de 2018.

O município de Uberaba está localizado no Estado de Minas Gerais, possui uma área de 4.523,957 km², população igual a 295.988 habitantes e densidade demográfica de 65,43 hab. km⁻² (IBGE, 2010). Situado na microrregião do Triângulo

Mineiro com latitude Sul $19^{\circ}45'27''$ e longitude Oeste $47^{\circ}55'36''$, possui altitude máxima, mínima e média igual a 1031 m, 522 m e 765 m, respectivamente. Faz fronteira com os municípios de Água Comprida, Conceição das Alagoas, Conquista, Delta, Indianópolis, Nova Ponte, Sacramento, Uberlândia e Veríssimo, conforme a Figura 6 (DRZ GEOTECNOLOGIA E CONSULTORIA LTDA., 2013).

Figura 6 - Localização de Uberaba



Fonte: DRZ Geotecnologia e Consultoria LTDA., 2013

Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019), a menor temperatura registrada em Uberaba foi de $-2,2^{\circ}\text{C}$ em 21 de julho de 1981, e a maior atingiu $40,7^{\circ}\text{C}$ em 17 de outubro de 2014, superando o recorde de $40,1^{\circ}\text{C}$ em 31 de outubro de 2002. O maior acumulado de precipitação em 24 horas atingiu 160,8 milímetros (mm) em 14 de novembro de 2016. Outros grandes acumulados iguais ou superiores a 100 mm foram 157 mm em 28 de março de 1991, 140,6 mm em 26 de novembro de 2017, 128,6 mm em 5 de fevereiro de 2008, 126,6 mm em 8 de abril de 2002, 109,2 mm em 3 de janeiro de 1997, 108,2 mm em 20 de maio de 2017, 107,8 mm em 18 de janeiro de 2003, 106 mm em 19 de outubro de 1978 e 103,6 mm em 1^o de dezembro de 2017 (INMET, 2019).

Para montagem e operação das pilhas, foi utilizado a composteira pertencente ao Departamento de Engenharia Ambiental da UFTM (coordenadas $19^{\circ}42'33.4''\text{S}$

47°57'41.6"W). A área utilizada foi dimensionada e construída pela própria Universidade e atende os parâmetros necessários para que as operações sejam eficientes e seguras, de acordo com Cerri et al. (2008), e são: impermeabilização do solo com concreto, declividade de 2%, calha coletora, caixa de contenção, cobertura e cercamento.

Como matéria prima para o experimento foram utilizados 400 kg de resíduos orgânicos de uma indústria alimentícia (*Tozzi Alimentos*) no qual eram compostos principalmente de cogumelos, azeitonas (com e sem caroço) e figos (Figura 7). Os resíduos foram coletados e armazenados em tambores (Figura 8), ao longo de uma semana. Devido ao longo tempo de armazenamento eles foram congelados em uma câmara fria a -11°C, para evitar que os resíduos entrassem em putrefação antes da montagem das pilhas.

Figura 7 - Resíduos orgânicos industriais utilizados no experimento



Fonte: Do autor, 2019

Figura 8 - Tambores onde foram armazenados os resíduos



Fonte: Do autor, 2019

Além dos resíduos, utilizou-se podas de grama oriundos da limpeza ao redor da composteira; esterco bovino maturado para a inoculação de microrganismos; e o fertilizante NPK 8-28-20 contendo 8% de Nitrogênio, 28% de Fósforo e 20% de Potássio; fertilizante sulfato de amônio contendo 21% de Nitrogênio e 22% de Enxofre.

Para construção das pilhas foi primeiramente necessário a trituração de todos materiais a fim de se obter um material homogêneo e com granulometria adequada para o processo de compostagem (para um ótimo ataque microbiano, conforme o item 3.3.1). Todo material foi cominuído pelo triturador de resíduos TR200 da Trapp, apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Triturador de resíduos orgânicos utilizado no experimento



Fonte: Do autor, 2019

Os resíduos orgânicos triturados juntamente com a palha da poda e o esterco foram misturados manualmente com o auxílio de pás e enxadas até se obter uma massa homogênea (Figura 10).

Figura 10 - Massa composta de resíduos, palha e esterco triturados



Fonte: Do autor, 2019

Essa massa foi então dividida em 4 partes iguais para a montagem de uma cada das pilhas do experimento. Todas as pilhas foram montadas sob uma base de galhos

como agente de suporte (Figura 11), para que houvesse uma maior aeração e também evitasse a compactação excessiva dos resíduos (item 3.1).

Figura 11 - Galhos utilizados como agentes de suporte na base das pilhas



Fonte: Do autor, 2019

As 4 pilhas foram assim dispostas (Figura 12):

- Pilha 1: representando a pila controle, constituída por apenas resíduos orgânicos industriais, podas de grama e esterco bovino, totalizando 118 kg;
- Pilha 2: composta por resíduos orgânicos industriais, podas de grama, esterco bovino e aeração facilitada por tubos de PVC perfurados, totalizando 118 kg;
- Pilha 3: composta por resíduos orgânicos industriais, podas de grama, esterco bovino, aeração facilitada por tubos de PVC perfurados, e NPK 8-28-20 e sulfato de amônio (21N-22S), totalizando 120,36 kg.
- Pilha 4: composta por resíduos orgânicos industriais, podas de grama, esterco bovino, NPK 8-28-20 e sulfato de amônio (21N-22S), totalizando 120,36 kg.

A massa utilizada de fertilizantes era correspondente a 2% da massa total das pilhas (resíduos, palha e esterco), ou seja, 2,36 kg.

Figura 12 - Pilhas de compostagem dos resíduos orgânicos industriais



Fonte: Do autor, 2019

Os parâmetros acompanhados foram: umidade, temperatura, pH e relação C/N como descrito no item 4.2.3. Para promover a oxigenação das pilhas 1 e 4, realizou-se revolvimento manual com auxílio de uma enxada, semanalmente. Para manter um teor de umidade ideal para o processo de compostagem, as pilhas foram irrigadas com água sempre quando necessário (umidade próximo ou abaixo de 40%). Ao final do processo de compostagem, determinou-se a massa final de cada uma das pilhas, utilizando uma balança eletrônica LS500 da empresa Marte.

4.1.2 Pilhas de resíduos urbanos

Para as pilhas do processo de compostagem dos resíduos orgânicos urbanos foram utilizados os mesmos equipamentos bem como a mesma composteira dos experimentos de compostagem dos resíduos orgânicos industriais (item 4.1.1). A montagem das pilhas se deu no dia 17 de outubro de 2018 e os parâmetros foram acompanhados até 19 de dezembro de 2018.

A matéria prima no caso dos resíduos orgânicos urbanos teve 4 origens: foram 200 kg de resíduos orgânicos oriundos da cozinha do hospital de clínicas da UFTM, 25 kg oriundos do restaurante universitário da mesma Universidade, 150 kg de um supermercado e 25 kg de um varejão, sendo esses dois últimos estabelecimentos também localizados na cidade de Uberaba, totalizando 400 kg de resíduos.

Os resíduos nas 4 fontes citadas foram coletados entre os dias 16 e 17 de outubro de 2018, e foram armazenados em sacos de lixo sem refrigeração (Figura 13). Os 400 kg de resíduos orgânicos urbanos foram misturados com esterco bovino maturado (inoculação de microrganismos) e palha de poda.

Figura 13 - Condicionamento dos resíduos orgânicos urbanos



Fonte: Do autor, 2019

Como são resíduos com características urbanas, eles são compostos por uma diversidade de materiais orgânicos (Figura 14), diferentemente dos resíduos orgânicos industriais que são compostos por tipos específicos de materiais, como se verifica na Figura 7.

Figura 14 - Resíduos orgânicos urbanos utilizados na montagem das pilhas de compostagem



Fonte: Do autor, 2019

Foi utilizado o mesmo triturador e também galhos como agente de suporte na base das pilhas (conforme item 4.1). A massa de resíduos foi triturada com esterco e palha, misturados com o auxílio de pás e enxadas e divididas em 4 partes iguais para a montagem das pilhas, seguindo a mesma metodologia do item anterior.

As 4 pilhas foram dispostas da seguinte maneira (Figura 15):

- Pilha 1: representando a pila controle, constituída por apenas resíduos orgânicos urbanos, podas de grama e esterco bovino, totalizando 108 kg;
- Pilha 2: continha resíduos orgânicos urbanos, podas de grama, esterco bovino e aeração facilitada por tubos de PVC perfurados, totalizando 108 kg;
- Pilha 3: composta por resíduos orgânicos urbanos, podas de grama, esterco bovino, aeração facilitada por tubos de PVC perfurados, e NPK 8-28-20 e sulfato de amônio (21N-22S), totalizando 110,16 kg;
- Pilha 4: composta por resíduos orgânicos urbanos, podas de grama, esterco bovino, NPK 8-28-20 e sulfato de amônio (21N-22S), totalizando 110,16 kg.

A massa utilizada de fertilizantes era correspondente a 2% da massa total das pilhas (resíduos, palha e esterco), ou seja, 2,16 kg.

Figura 15 - As quatro pilhas de compostagem dos resíduos orgânicos urbanos



Fonte: Do autor, 2019

Os mesmos procedimentos metodológicos de acompanhamento de parâmetros, irrigação e oxigenação das pilhas de resíduos industriais foram realizados para as pilhas de resíduos urbanos, bem como ao final do processo foi medida a massa de cada uma das pilhas.

4.2.3 Determinação dos parâmetros

Durante a condução do processo de compostagem foram acompanhados uma vez por semana os seguintes parâmetros: temperatura, pH e umidade. A relação C/N foi acompanhada mensalmente. A determinação desses parâmetros é importante para acompanhar a evolução do processo de compostagem na degradação da matéria orgânica (relação C/N), manter a atividade microbiana ótima (umidade e pH), além de garantir a eliminação de patógenos e sementes infestantes (temperatura), como melhor pode ser compreendido no item 3.3.

Os experimentos de temperatura, pH e umidade foram conduzidos no laboratório de Saneamento Ambiental, pertencente ao Departamento de Engenharia Ambiental da UFTM. Os experimentos para determinação da relação C/N foram conduzidos no laboratório de química do Departamento de Química da Universidade Federal de Uberlândia.

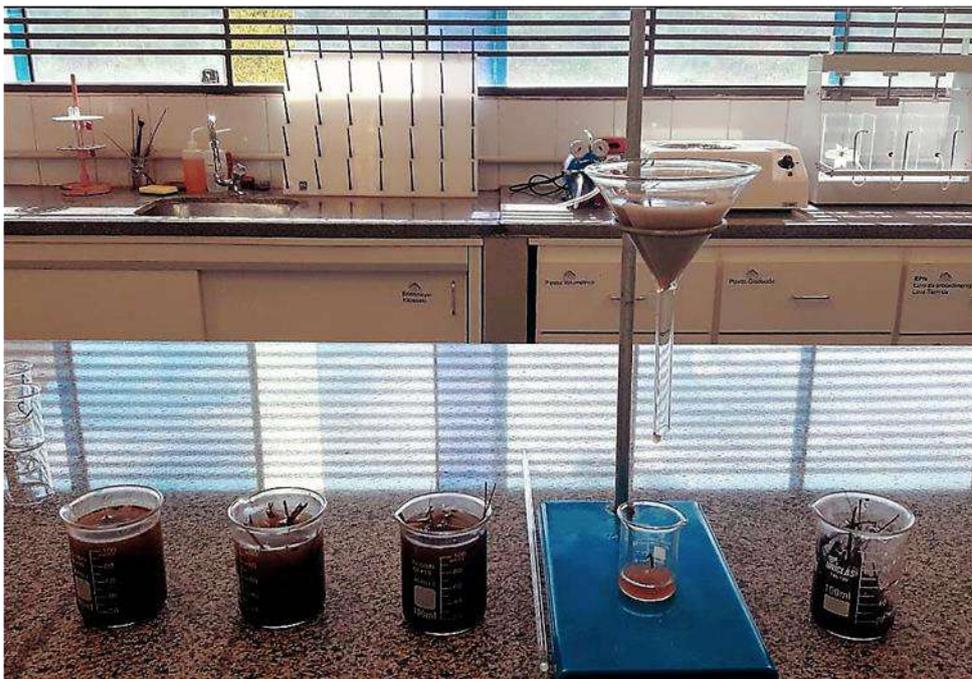
4.2.3.1 Temperatura

A temperatura foi monitorada inicialmente durante os primeiros dias (para acompanhar a fase termófila) e posteriormente foi monitorada uma vez por semana. A medição era realizada por termômetro de mercúrio (0 a 150°C) inserido lateralmente no meio da pilha, onde permanecia por um período de 2 min.

4.2.3.2 pH

As determinações do pH foram realizadas em medidor de pH de bancada (HMMPB-210). Para tal foram separados cerca de 25 g de uma amostra representativa de cada pilha em um béquer enumerado e adicionado água destilada no recipiente até atingir um volume de 50 mL. Essa mistura foi agitada e com um bastão de vidro e, posteriormente, submetida a uma filtração simples (Figura 16). Com a amostra filtrada, o eletrodo do pHmetro era imerso na solução extratora e a leitura do pH era realizada.

Figura 16 - Procedimento para a determinação do pH das pilhas



Fonte: Do autor, 2019

4.2.3.3 Umidade

O método utilizado para determinação da umidade (W), foi o de secagem em estufa. A estufa utilizada era do modelo TETCD, com tensão de 110V e 1500 Watts de potência. Inicialmente, colocou-se os cadinhos dentro da estufa a 105°C por um período de 30 min, a fim de retirar a umidade presente no recipiente.

Posteriormente, com o uso de uma balança analítica, anotou-se a massa do cadinho vazio (M_c) e acrescentou-se, aproximadamente, cerca de 50g de uma amostra representativa de cada pilha em cadinhos enumerados de acordo com a pilha representante e se tomou nota dessa massa (M_u).

As amostras nos cadinhos foram então colocadas na estufa a 105 °C até massa constante, o que ocorria por volta de 4 h. Após a retirada da amostra, o cadinho com a massa seca foi pesado na balança analítica (M_s). A equação 1 foi empregada para determinar o teor de umidade de cada amostra.

$$W = \frac{(M_u - M_s)}{(M_u - M_c)} \cdot 100(1)$$

Em que:

W : teor de umidade (%).

M_u : massa do cadinho + massa da amostra úmida (g).

M_s : massa do cadinho + massa da amostra seca (g).

M_c : massa do cadinho (g).

4.2.3.4 Relação C/N

A relação C/N foi calculada através da equação 2.

$$Relação\ C/N = \frac{\% \text{ cot}}{\% \text{ NTK}}(2)$$

Em que:

% COT: percentual de Carbono Orgânico Total em relação à massa total (%).

% NTK: percentual de Nitrogênio total de Kjeldahl em relação à massa total (%).

Para a determinação do COT foi realizado o método de Tinsley. Uma amostra de 0,0150 g foi seca a 75 °C e moída (para as partículas ficarem com diâmetros de 2

mm), adicionou-se 25 mL de solução extratora [(19,87 g de dicromato de sódio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) + 200 mL de ácido ortofosfórico + 400 mL de ácido sulfúrico). L^{-1}]. A mistura foi despejada num balão Erlenmeyer com o tubo de refluxo, e foi colocada numa placa de aquecimento que ficou em ebulição moderada durante 2 h.

Após o resfriamento, adicionou-se cerca de 200 mL de água deionizada e 4 mL de solução indicadora [(0,3 g de difenilamina-sulfonato de bário + 58,7 g de cloreto de bário). L^{-1}]. Então se realizou a titulação com a solução de sal de Mohr [(156,86 g de sulfato ferroso amoniacal- $6\text{H}_2\text{O}$ + 20 mL de ácido sulfúrico). L^{-1}]. Foi ainda realizado um ensaio em branco apenas com a solução extratora e um ensaio para a determinação da concentração do sal de Mohr.

Para a determinação do NTK, a amostra foi seca a 75°C e moída para que os diâmetros das partículas fossem com 2 mm. Dessa amostra, pesou-se 1 g e juntou-se 10 mL de uma solução de ácido sulfúrico com ácido salicílico, deixando agir por aproximadamente 12 h. Em seguida, 50 mL do extrato foi destilada em meio alcalino e depois foi realizada uma titulação. Os resultados foram expressos em porcentagem.

4.2 APLICAÇÃO DOS COMPOSTOS EM ALFACES

Para analisar a eficiência agrônômica dos compostos produzidos os mesmos foram aplicados na cultura de alfaces (*Lactuca sativa L.*) para analisar o crescimento dessa espécie vegetal. Foram realizadas a aplicação dos compostos obtidos em condições naturais (ao ar livre do lado da composteira da UFTM) e em estufa (pertencente à UFTM), a fim de analisar e comparar os resultados obtidos.

A metodologia aqui utilizada foi baseada e adaptada de Gonçalves et al. (2014) e do Manual de Adubação Orgânica de Hortaliças e Frutíferas (INSTITUTO AGRONÔMICO, 2013).

4.2.1 Aplicação dos compostos em condições naturais

A aplicação dos compostos provenientes dos resíduos industriais em condições naturais teve uma primeira rodada realizada de 25 de junho a 01 de agosto de 2018. Foram realizados 4 tratamentos (Figura 17):

- TR (1): Apenas solo (Tratamento controle);

- TR (2): Composto orgânico comercial fabricado pela empresa Holanda (na proporção de solo:composto igual a 4:1 v/v);
- TR (3): Composto orgânico das pilhas 1 e 2, oriundo dos resíduos industriais, que não possuíam fertilizante químico (na proporção de solo:composto igual a 4:1 v/v);
- TR (4): Composto orgânico das pilhas 3 e 4, oriundo dos resíduos industriais, que possuíam fertilizante químico (na proporção de solo:composto igual a 4:1 v/v).

Figura 17 - Os tratamentos empregados no cultivo das alfaces: (1) controle. (2) composto comercial, (3) composto sem fertilizante químico, (4) composto com fertilizante químico



Fonte: Do autor, 2019

Para o experimento foram utilizados recipientes de plástico com capacidade de 250 mL e 10 cm de diâmetro, que foram preenchidos com solo até a metade, e os tratamentos 2, 3 e 4 receberam a quantidade de composto orgânico dada pela equação 3.

$$m = A_p \cdot q_c(3)$$

Em que:

m : massa de composto requerida por pote (kg)

A_p : Área circular dos recipientes – ($\pi \cdot r^2$) - (m^2)

q_c : massa de composto orgânico tabelado ($kg \cdot m^{-2}$)

Os valores utilizados para a determinação da massa de composto orgânico a ser acrescentado para a adubação das alfaces nos recipientes, foram consultados no Manual de Adubação Orgânica de Hortaliças e Frutíferas (INSTITUTO AGRONÔMICO, 2013).

O solo utilizado no experimento foi doado pela empresa Soma Ambiental do município de Uberaba, e possuía os parâmetros apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros do solo utilizado no cultivo das alfaces na primeira rodada

Sigla	Determinação	Unidade	Valores
MO	Matéria Orgânica	g. dm ⁻³	16,4
pH	Potencial Hidrogeniônico	---	5,3
P	Fósforo	mg. dm ⁻³	1
K	Potássio	mmolc. dm ⁻³	2,4
Ca	Cálcio	mmolc. dm ⁻³	4
Mg	Magnésio	mmolc. dm ⁻³	1,2
Al	Alumínio	mmolc. dm ⁻³	0
H ⁺ Al	Acidez Potencial	mmolc. dm ⁻³	24
S.B.	Soma bases	mmolc. dm ⁻³	7,6
CTC	Capacidade de troca catiônica	mmolc. dm ⁻³	31,6
Ca/Mg	---	---	3,33
Ca/K	---	---	1,67
Mg/K	---	---	0,5
CT	Carbono Total	g. dm ⁻³	9,53
Argila	Argila	g. dm ⁻³	390
Areia	Areia	g. dm ⁻³	161
Silte	Silte	g. dm ⁻³	449

Fonte: Soma Ambiental, 2019

Como o pH ideal para o cultivo de alface é por volta de 6 (item 3.3.3) foi realizada a correção do pH desse solo com adição de NaOH. O composto orgânico comercial utilizado nos experimentos é do tipo “terra vegetal” fabricado pela empresa Holanda do município de Rio Claro - SP, e continha os parâmetros dispostos no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros do composto comercial

Sigla	Determinação	Unidade	Valores
pH	Potencial Hidrogeniônico	-----	6,8
CT	Carbono total	g. dm ⁻³	9,8
N	Nitrogênio	mmolc. dm ⁻³	1,1
P ₂ O ₅	Fosfato	g. dm ⁻³	2,65
K	Potássio	mmolc. dm ⁻³	0,67
CaO	Óxido de cálcio	g. dm ⁻³	3,1
MgO	Óxido de magnésio	g. dm ⁻³	3,5
SO ₄	Sulfato	g. dm ⁻³	1,36
Umidade	-----	%	38
Cu	Cobre	mmolc. dm ⁻³	285
Fe	Ferro	mmolc. dm ⁻³	9989
Mn	Manganês	mmolc. dm ⁻³	75
Zn	Zinco	mmolc. dm ⁻³	45
MO	Matéria Orgânica	g. dm ⁻³	16,8
CTC	Capacidade de troca catiônica	mmolc. dm ⁻³	280

Fonte: Holanda, 2018

Semeou-se 10 sementes de alface (*Lactuca sativa* L.) por recipiente, do cultivar Feltrin Sementes. Os recipientes foram colocados ao ar livre, sob incidência direta de luz solar no período da manhã.

Após 10 dias de crescimento com irrigação duas vezes ao dia (início da manhã e final da tarde) foi realizado o desbaste. Para calcular a quantidade de água a ser utilizada na irrigação foi estimada a capacidade de campo do solo utilizado nos experimentos de acordo com Albuquerque et. al. (2010). Desta forma a capacidade de campo foi de aproximadamente 0,4 cm³. cm⁻³, e portanto o volume necessário de água para irrigar os 125 cm³ de solo (metade do recipiente de 250 mL) foi aproximadamente de 50 mL por recipiente.

A análise de crescimento das plantas foi realizada com 17, 24, 31 e 38 dias de experimento, com 5 repetições cada. Tais experimentos foram conduzidos no Laboratório de Saneamento Ambiental da UFTM.

Para a análise de crescimento as alfaces foram lavadas cuidadosamente com água destilada, visando a remoção de partículas do substrato agregadas ao sistema radicular. Determinou-se os mesmos parâmetros dos experimentos de Gonçalves et al. (2014):

- NF (número de folhas): contagem simples do número de folhas no pé da alface;
- AP (altura média das plantas): medição do colo da planta até a extremidade da maior folha por régua graduada em cm;
- MF (massa da matéria fresca): medição em balança analítica do sistema radicular e da parte aérea em g;
- MS (massa da matéria seca): medição em balança analítica da matéria fresca, após a secagem em estufa à 55°C até massa constante do sistema radicular e da parte aérea em g.

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística pelo teste de ANOVA com o uso do software *Microsoft Office Excel*, versão 2018. A análise estatística com o teste de ANOVA foi realizada para um fator com nível de significância de 5%. Cada um dos parâmetros analisados (NF, AP, MF e MS) para cada uma das etapas do experimento (17, 24, 31 e 38 dias) foram tratados como fatores únicos e independentes nesse teste.

O fator de interesse do teste era o tipo ou a ausência de composto orgânico, os níveis dos fatores foram os quatro tratamentos experimentados: TR (1), TR (2), TR (3) e TR (4), as variáveis de resposta foram os parâmetros NF, AP, MF e MS nas quatro etapas (que foram submetidos ao teste separadamente) com as 5 réplicas cada.

Uma segunda rodada desses experimentos foi realizada de 12 de março a 18 de abril de 2019, na qual foram incluídos os tratamentos com os compostos oriundos das pilhas dos resíduos urbanos:

- TR (1): Apenas solo (Tratamento controle);
- TR (2): Composto orgânico comercial fabricado pela empresa Holanda (na proporção de solo:composto igual a 4:1 v/v);
- TR (3): Composto orgânico das pilhas 1 e 2, oriundo dos resíduos industriais, que não possuíam fertilizante químico (na proporção de solo:composto igual a 4:1 v/v);

- TR (4): Composto orgânico das pilhas 3 e 4, oriundo dos resíduos industriais, que possuíam fertilizante químico (na proporção de solo:composto igual a 4:1 v/v);
- TR (5): Composto orgânico das pilhas 1 e 2, oriundo dos resíduos urbanos, que não possuíam fertilizante químico (na proporção de solo:composto igual a 4:1 v/v);
- TR (6): Composto orgânico das pilhas 3 e 4, oriundo dos resíduos urbanos, que possuíam fertilizante químico (na proporção de solo:composto igual a 4:1 v/v);

Nessa segunda rodada o solo foi retirado ao lado da composteira da UFTM, e possuía as características dispostas no Quadro 4.

Quadro 4 - Parâmetros do solo utilizado no cultivo das alfaces na segunda rodada

Sigla	Determinação	Unidade	Valores
MO	Matéria Orgânica	g. dm ⁻³	18,5
pH	Potencial Hidrogeniônico	---	6,75
P	Fósforo	mg. dm ⁻³	0,3
K	Potássio	mmolc. dm ⁻³	122
Ca	Cálcio	mmolc. dm ⁻³	3,5
Mg	Magnésio	mmolc. dm ⁻³	1,6
Al	Alumínio	mmolc. dm ⁻³	0
H ⁺ Al	Ac. Potencial	mmolc. dm ⁻³	4
S.B.	Soma bases	mmolc. dm ⁻³	4,31
CTC	Capacidade de troca catiônica	mmolc. dm ⁻³	8,31
Ca/Mg	---	---	7
Ca/K	---	---	11,22
Mg/K	---	---	1,6
CT	Carbono Total	g. dm ⁻³	10,85
Argila	Argila	g. dm ⁻³	412
Areia	Areia	g. dm ⁻³	145
Silte	Silte	g. dm ⁻³	489

Fonte: Laboratório de análises de solo da FAZU (Faculdades Associadas de Uberaba), 2019

Como o pH desse solo já estava por volta de 6 não houve necessidade de correção. O restante da metodologia seguiu-se como na primeira rodada dos experimentos, utilizando-se recipientes iguais, a mesma quantidade de compostos em cada tratamento, e foi realizada a determinação dos mesmos parâmetros de crescimento da alface (NF, AP, MF e MS) com 17, 24, 31 e 38 dias de experimento.

4.2.2 Aplicação dos compostos em estufa

A aplicação dos compostos provenientes dos resíduos industriais e urbanos em estufa foi realizada de forma conjunta com a segunda rodada dos experimentos ao ar livre, de 12 de março a 18 de abril de 2019.

Foi realizada a mesma metodologia do item 4.2.1, com o mesmo solo caracterizado no Quadro 4, e o composto comercial caracterizado no Quadro 3. A estufa empregada na realização dos referidos experimentos é apresentada na Figura 18.

Figura 18 - Estufa utilizada nos experimentos de aplicação dos compostos



Fonte: Do autor, 2019

4.3 DIMENSIONAMENTO DO PÁTIO DE COMPOSTAGEM

Após a realização dos experimentos foram dimensionados dois tipos de pátios de compostagem para municípios. Um pátio foi dimensionado utilizando os parâmetros e técnicas de compostagem convencionais, o outro utilizou os parâmetros e técnicas potencializados por este estudo.

As metodologias adotadas para tais dimensionamentos foram baseadas e adaptadas do Manual para Implantação de Compostagem e de Coleta Seletiva no Âmbito de Consórcios Públicos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2010).

4.3.1 Dimensionamento do pátio de compostagem convencional

No dimensionamento do pátio de compostagem para um município são necessários seus dados gravimétricos para conhecer a massa diária de resíduos gerada (m) e a porcentagem de resíduos orgânicos em relação ao total da produção (p). Com esses dados é necessário definir a quantidade total de resíduos orgânicos e assim encontrar sua massa diária (m_o). A massa diária foi determinada empregando a equação 4.

$$m_o = \frac{m \cdot p}{100} \quad (4)$$

Em que:

m : massa diária de resíduos (kg. dia⁻¹)

m_o : massa diária de resíduos orgânicos (kg. dia⁻¹)

p : porcentagem de resíduos orgânicos (%)

Para que o processo de compostagem ocorra adequadamente é necessário adequar a relação C/N da massa a ser compostada (item 3.3.6), para isso são necessários estudos sobre a relação C/N dos resíduos do município. Para adequá-la pode ser necessário acrescentar materiais ricos em carbono e/ou materiais ricos em nitrogênio.

Com a equação 5 pode-se determinar a quantidade de material rico em carbono e/ou nitrogênio (m_a) que será adicionado em conjunto com os resíduos orgânicos na leira de compostagem.

$$m_a = \frac{m_o \cdot p_a}{100} \quad (5)$$

Em que:

m_a : massa do material a ser adicionado (kg)

p_a : porcentagem do material a ser adicionado (%)

Assim são somadas estas duas massas (m_a e m_o) para definir a massa total (m_t) a ser compostada. Na sequência, utiliza-se a equação 6 para determinar o volume (v) que será colocado nas pilhas.

$$v = \frac{m_t}{\gamma} \quad (6)$$

Em que:

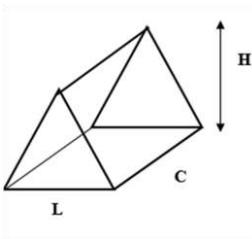
v : volume diário ($m^3 \cdot dia^{-1}$)

m_t : massa total a ser compostada (kg)

γ : peso específico do resíduo compactado ($kg \cdot m^{-3}$)

As leiras terão o formato piramidal estendido, conforme a Figura 19. Adotando-se valores de largura (L) e altura (H) que podem ser encontrados na literatura, calcula-se a área da secção transversal da leira (A_t) pela equação 7.

Figura 19 - Formato das leiras de compostagem



Fonte: Do autor, 2019

$$A_t = \frac{L \cdot H}{2} \quad (7)$$

Em que:

A_t : Área da secção transversal (m^2)

L : largura (m)

H : altura (m)

Utilizando os valores encontrados, pode-se calcular o comprimento (C) e a área de uma leira (A_l) com as equações 8 e 9, respectivamente.

$$C = \frac{V}{A_t} (8)$$

Em que:

C: comprimento de uma leira (m)

$$A_l = C \cdot L (9)$$

Em que:

A_l : área de uma leira (m^2)

Após estes procedimentos, pode-se calcular a área total do pátio de compostagem convencional. Para tal utiliza-se a equação 10.

$$A_t = (2 \cdot A_l \cdot d) + (2 \cdot A_l \cdot d) \cdot 0,1 (10)$$

Em que:

A_t : área total (m^2)

d: quantidade de dias para estabilização do material (dias)

No método convencional de compostagem (como a pilha 1 dos experimentos), é necessário o dobro da área de leiras para que elas possam ser revolvidas manualmente. Também é necessário adicionar um valor de 10% de segurança, circulação, equipamentos e área de serviços.

4.3.2 Dimensionamento do pátio de compostagem potencializado

Para o dimensionamento do pátio de compostagem potencializado são utilizadas as equações 3 a 8, seguindo a mesma metodologia do item 4.3.1. A diferença está no cálculo da área total do pátio, onde no processo potencializado não é necessário o dobro da área de leiras já que não precisará de revolvimento manual (como a pilha 3 dos experimentos). Assim utiliza-se a equação 11.

$$A_t = (A_l \cdot d) + (C \cdot d \cdot 1) + (A_l \cdot d) \cdot 0,1(11)$$

No método potencializado de compostagem o tempo (d) será menor em relação ao processo convencional, também foi considerado o espaçamento de 1 m entre as leiras para circulação de trabalhadores e equipamentos, bem como foi adicionado um valor de 10% de segurança, equipamentos e áreas de serviço.

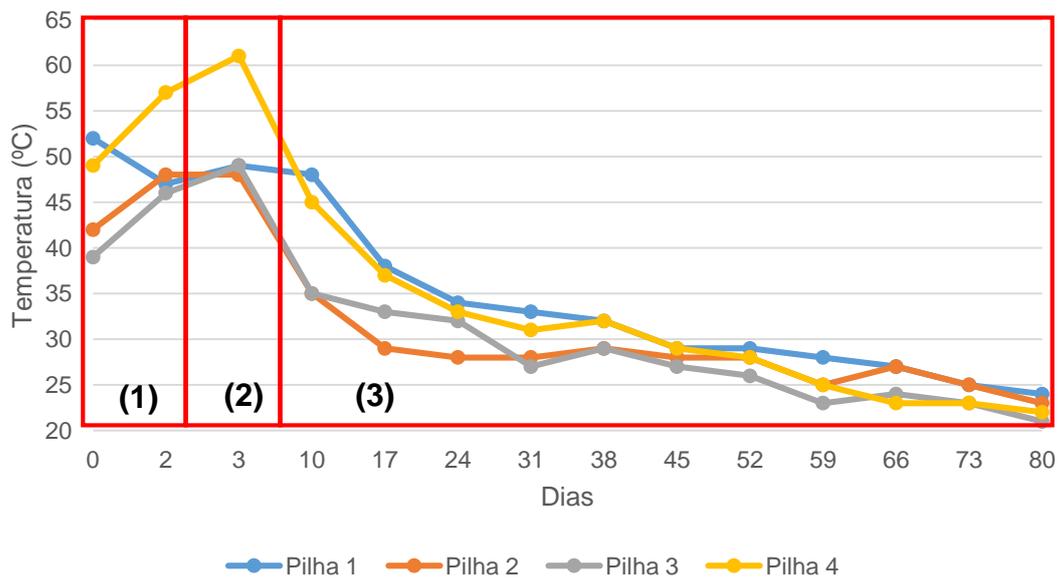
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 EXPERIMENTOS DE COMPOSTAGEM

5.1.2 Compostagem de resíduos industriais

Os resultados obtidos para o parâmetro de temperatura estão dispostos no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Valores de temperatura na compostagem dos resíduos industriais



Fonte: Do autor, 2019

No Gráfico 1 estão destacadas cada uma das fases da compostagem em relação à evolução da temperatura, que segundo Cunha Queda (1999) é caracterizada pela existência de três fases: fase mesófila inicial (1), fase termófila (2) e fase mesófila final (3). A duração e a evolução de cada uma destas fases dependem das

características físicas, físico-químicas e químicas da matriz inicial, do método de compostagem utilizado e do controle dos parâmetros operacionais ao longo do processo.

A ACR (2005), norma Canadense para qualidade de compostos orgânicos do *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME), preconiza que é necessária a temperatura mínima de 55°C por pelo menos três dias para o processo de leiras estáticas aeradas para assegurar a eliminação de organismos patogênicos e ervas infestantes.

Para tal exigência, somente a pilha 4 assegurou a temperatura para a eliminação de patógenos durante a fase termófila, o que pode ser explicado pela configuração geométrica das pilhas aqui experimentadas que são menores do que as pilhas utilizadas em processos de compostagem de larga escala, e, portanto, acabam dissipando o calor com maior facilidade.

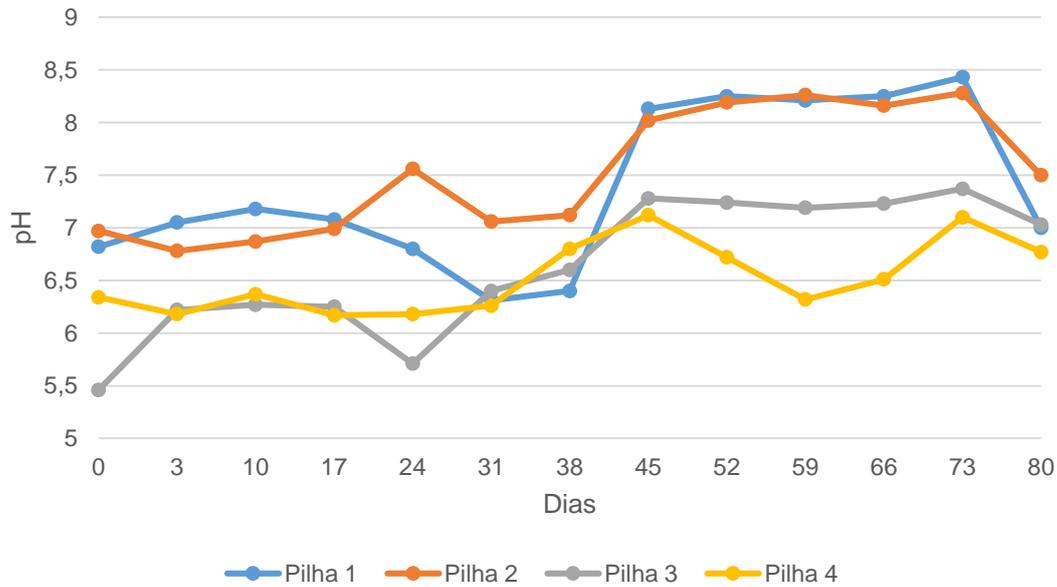
Temperaturas altas, apesar de necessárias, quando em excesso (acima de 80°C) por longos períodos são prejudiciais ao processo devido à inibição do crescimento e mesmo à morte de microrganismos não termotolerantes (Russo, 2004).

Segundo Pessin et al. (2014), a fase mesófila final (maturação) é considerada o estágio final da degradação do material compostável na qual a quantidade de oxigênio requerida é menor, tornando o processo biológico mais lento, a temperatura tende a baixar até se aproximar à do ambiente e ocorre a mineralização da matéria orgânica. Observa-se que todas as pilhas atingiram a fase de maturação, na qual a temperatura foi estabilizando até atingir a temperatura ambiente.

Os resultados dispostos no Gráfico 1 estão em consonância com os expostos nos estudos de Silva (2016) e Carli (2010). Em tais experimentos de compostagem de resíduos orgânicos em pilhas, a temperatura apresenta uma fase mesófila inicial (aumento gradativo da temperatura), fase termófila (ápice da temperatura com a eliminação de patógenos), seguida da fase mesófila final (queda gradual da temperatura até estabilização do composto).

No Gráfico 2 estão dispostos os resultados obtidos de pH para a compostagem dos resíduos industriais.

Gráfico 2 - Valores de pH na compostagem dos resíduos industriais



Fonte: Do autor, 2019

Segundo Rodrigues, Barreira & Kovacs (2006), a faixa de pH ótima para o desenvolvimento dos microrganismos no processo de compostagem situa-se na faixa de 5,5 a 8,5 e ao final deste se encontram entre 7 e 8,5. Com isso, nota-se que durante o processo de compostagem o pH de todas pilhas permaneceu dentro dessa faixa ótima.

O pH das pilhas 3 e 4 mostrou-se inferior aos das pilhas 1 e 2, devido a presença de fertilizante químico nessas pilhas, no qual segundo Francisco (2008), o processo de nitrificação (sulfato de amônio) e posterior liberação de H^+ , aumentou a acidez principalmente no início do processo.

Os resultados de pH na compostagem dos resíduos industriais não foram exatamente coincidentes com as fases de evolução do pH propostas por Mustin (1987), que está detalhada no Quadro 1. Mas de forma geral e se baseando na literatura de Mustin (1987), o pH das pilhas alguns dias após o início da compostagem aumentou (devido à produção de nitrogênio na forma amoniacal, alcalino, proveniente da hidrólise do nitrogênio orgânico) e posteriormente o valor de pH tende para a neutralidade (esta estabilização do pH deve-se às reações de maturação e ao poder tampão do húmus).

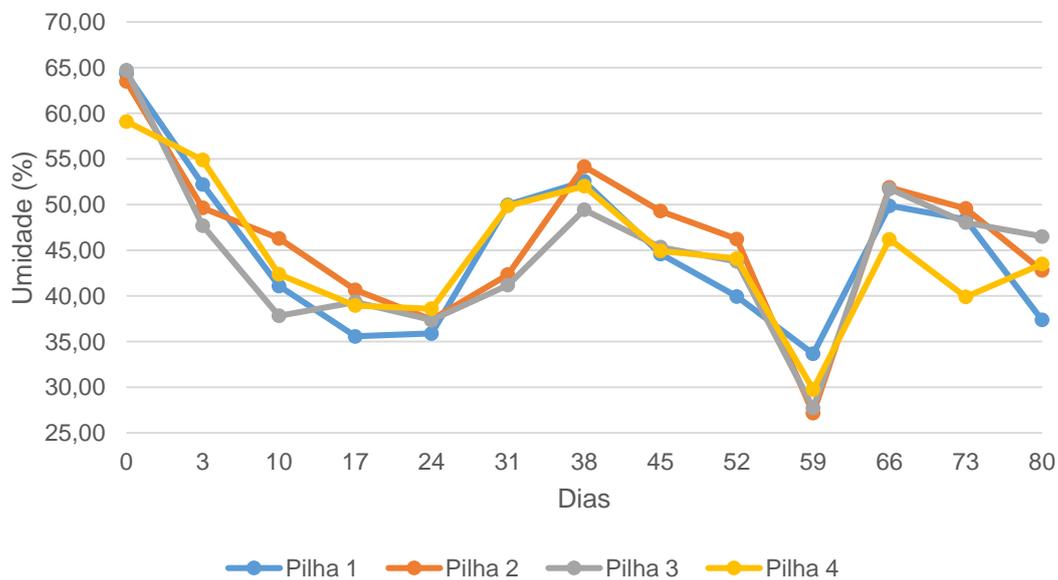
O processo de compostagem pode ser problemático se o pH da mistura estiver com valores inferiores a 5, provocando uma redução significativa na atividade microbiológica e a pilha poderia não alcançar a fase termofílica (MASSUKADO, 2008).

O monitoramento do pH ao longo de todo processo não apresentou valores em discrepâncias aos dados reportados na literatura (MASSUKADO, 2008).

Resultados parecidos são encontrados em Cordeiro (2010) e Silva (2016), nos quais o pH das pilhas durante o processo de compostagem inicia-se baixo, em seguida aumenta gradativamente, e durante a maturação do composto tende para a neutralidade.

Os teores de umidade obtidos para as pilhas de compostagem estão demonstrados no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Teores de umidade na compostagem dos resíduos industriais



Fonte: Do autor, 2019

A faixa de umidade ótima para se obter o máximo de atividade microbiológica na decomposição localiza-se entre 40 a 60% (MERCCKEL,1981). Portanto durante o experimento apesar da oscilação dos valores de umidade, quando havia valores próximos ou inferiores a 40% era realizada a irrigação da massa de maneira que a umidade aumentasse, assim como nos experimentos de Cordeiro (2010). Outro fator importante que ajuda explicar a oscilação da umidade é a temperatura ambiente e a umidade do ar circundante às pilhas, que não é constante ao longo do experimento.

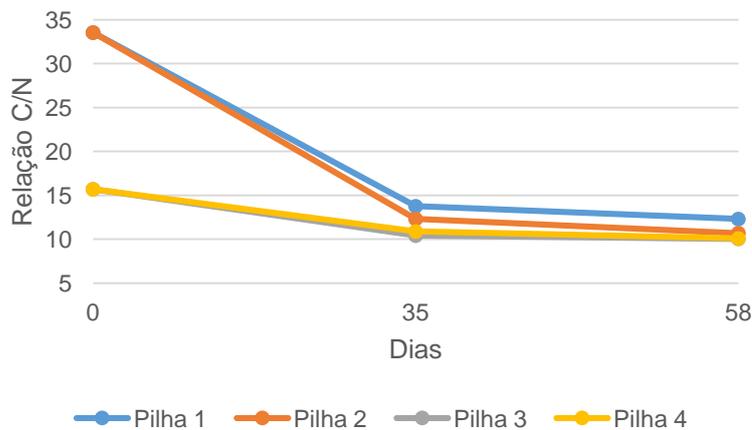
Segundo Pereira Neto (2007), a compostagem que é um processo aeróbio, na prática, a sua umidade ideal deve ser manejada com base na capacidade de aeração da massa de compostagem, ou seja, deve-se observar características físicas como a

porosidade e a estrutura do material, sempre objetivando satisfazer a demanda por oxigênio da massa a ser compostada.

Cordeiro (2010), Silva (2016) e Carli (2010), assim como nos experimentos aqui realizados, também tiveram oscilações de umidade que foram controladas com irrigações quando necessárias.

Os resultados obtidos para a relação C/N estão plotados no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Relação C/N na compostagem dos resíduos industriais



Fonte: Do autor, 2019

Para Vallini (1995) o intervalo ótimo para a relação C/N no início da compostagem deve estar compreendido entre 25:1 e 30:1, e o intervalo de compatibilidade (susceptível de ser utilizado) entre 20:1 e 40:1. Considerando esses intervalos as pilhas 1 e 2 estavam adequadas (34:1), porém as pilhas 3 e 4 (15:1) estavam com a relação C/N abaixo do requerido. Este fato já era esperado pois o fertilizante químico acrescentado a essas pilhas continham nitrogênio.

Segundo Kiehl (1998) o composto quando atinge a maturidade, ou seja, transformou-se em produto humificado, a relação C/N se situa em torno de 10:1. Neste experimento a relação C/N atingiu 10:1 por volta dos 35 dias para as pilhas 3 e 4, e em torno dos 58 dias para as demais pilhas.

Cordeiro (2010), Silva (2016) e Carli (2010) que também realizaram experimentos de compostagem em pilhas, utilizaram o parâmetro da relação C/N para estabelecer a estabilização das pilhas quando essas atingissem tal relação em torno de 10:1.

Pode-se apontar que as pilhas 3 e 4 foram mais eficientes no tempo de estabilização do composto (potencializando o processo). Sendo que a pilha 1 (controle) e a pilha 2 (aerada) indicaram uma estabilização mais lenta, 23 dias após as pilhas que continham fertilizante.

Ao final do processo de compostagem e do acompanhamento dos parâmetros, mediu-se a massa dos compostos obtidos em cada uma das pilhas (Tabela 1).

Tabela 1 - Massa das pilhas ao final da compostagem dos resíduos industriais

Pilha	Massa inicial (Kg)	Massa final (Kg)	% de redução
1	118	49,28	58,23
2	118	44,58	62,22
3	120,36	48,54	59,55
4	120,36	44,9	62,58

Fonte: Do autor, 2019

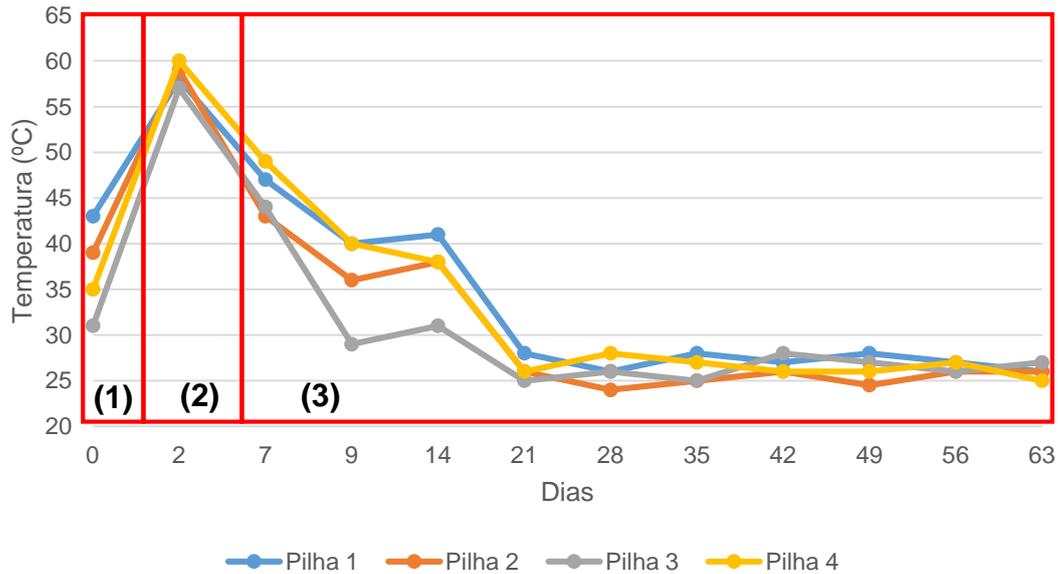
A média de redução da massa das pilhas foi de 60,6% o que corrobora com o quão importante pode ser esse processo no tratamento dos resíduos orgânicos.

Esse resultado vem de encontro ao proposto por Massukado (2008), no qual é afirmado que o processo de compostagem consegue proporcionar uma redução média de até 60% do volume total das pilhas, sendo que ao longo da degradação o material é convertido em matéria orgânica estável, liberando CO₂ e H₂O entre outros compostos em menores quantidades.

5.1.3 Compostagem de resíduos urbanos

Em relação a compostagem dos resíduos urbanos os resultados obtidos para o parâmetro temperatura encontram-se plotados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Valores de temperatura na compostagem dos resíduos urbanos



Fonte: Do autor, 2019

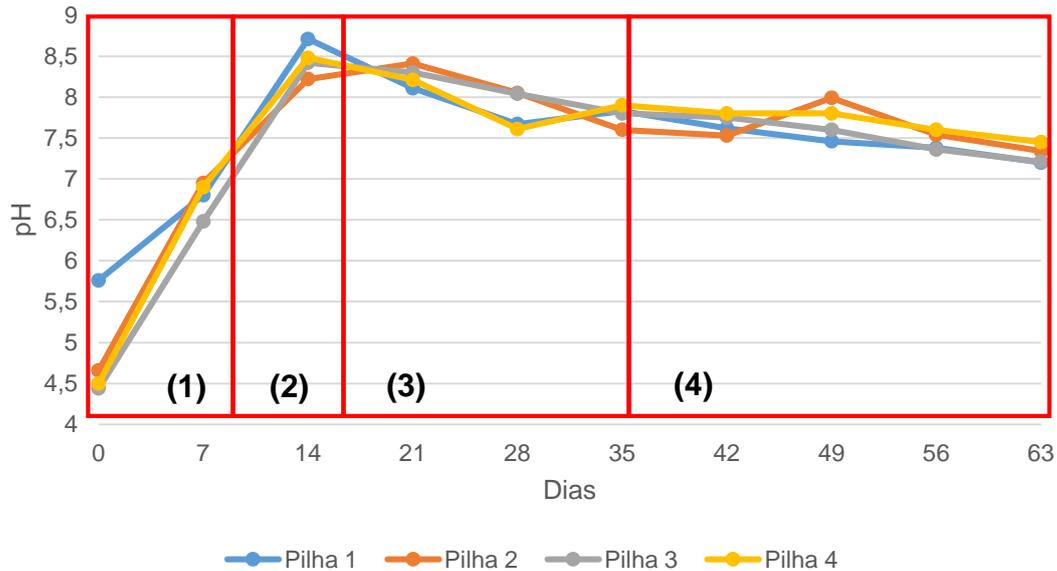
No Gráfico 5 estão destacadas cada uma das fases da compostagem em relação à evolução da temperatura: fase mesófila inicial (1), fase termófila (2) e fase mesófila final (3), baseando-se em Cunha Queda (1999). Não foram atingidas altas temperaturas (acima de 80°C), o que segundo Russo (2004) poderia levar à inibição do crescimento e à morte de microrganismos não termotolerantes.

É visto que neste experimento foi cumprido o preconizado pela norma Canadense para qualidade de compostos orgânicos do *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME), ACR (2005). A temperatura em todas as 4 pilhas atingiu o mínimo de 55°C por pelo menos três dias, o que em tese segundo essa norma, garante a eliminação de organismos patogênicos e ervas infestantes.

Assim como nos resultados dos experimentos com resíduos industriais, os apresentados no Gráfico 5 coincidem com Silva (2016) e Carli (2010), nos quais a temperatura apresenta uma fase mesófila inicial (aumento gradativo da temperatura), fase termófila (ápice da temperatura com a eliminação de patógenos), seguida da fase mesófila final (queda gradual da temperatura até estabilização do composto).

No Gráfico 6 estão os resultados de pH para cada uma das 4 pilhas nos experimentos com resíduos urbanos.

Gráfico 6 - Valores de pH na compostagem dos resíduos urbanos



Fonte: Do autor, 2019

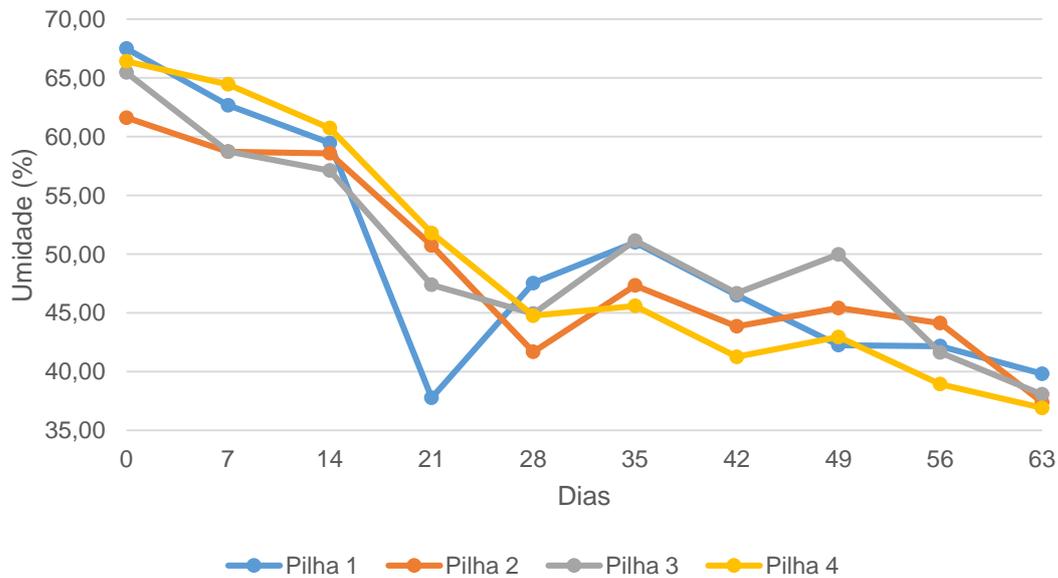
No Gráfico 6 durante o processo de compostagem o pH de todas as pilhas permaneceu dentro da faixa de 5,5 a 8,5 na maior parte do tempo, o que segundo Rodrigues, Barreira & Kovacs (2006) é o ideal para o desenvolvimento dos microrganismos. Desta forma o pH não ficou abaixo de 5, o que poderia provocar uma redução significativa na atividade microbiológica e a pilha poderia não alcançar a fase termofílica (MASSUKADO, 2008).

A evolução do pH durante a compostagem dos resíduos urbanos foi coincidente com as fases propostas por Mustin (1987), dispostas no Quadro 1. As fases estão destacadas no Gráfico 6: 1 (pH ácido, ocorre a produção de CO₂ e de ácidos orgânicos), 2 (o pH aumenta devido à produção de nitrogênio na forma amoniacal proveniente da hidrólise do nitrogênio orgânico), 3 (início da estabilização do pH, no qual o amoníaco produzido na fase anterior diminui, devido à sua volatilização e pela ação de bactérias nitrificantes que o oxidam da forma amoniacal à forma de nitrito e, posteriormente, à nitrato), 4 (o valor de pH tende para a neutralidade, esta estabilização do pH deve-se às reações de maturação e ao poder tampão do húmus).

Cordeiro (2010) e Silva (2016) encontraram resultados parecidos, nos quais e em linhas gerais o pH das pilhas durante o processo de compostagem inicia-se baixo, em seguida aumenta gradativamente, e finalmente durante a maturação do composto ele tende para a neutralidade.

Para o parâmetro de umidade os resultados encontram-se no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Teores de umidade na compostagem dos resíduos urbanos



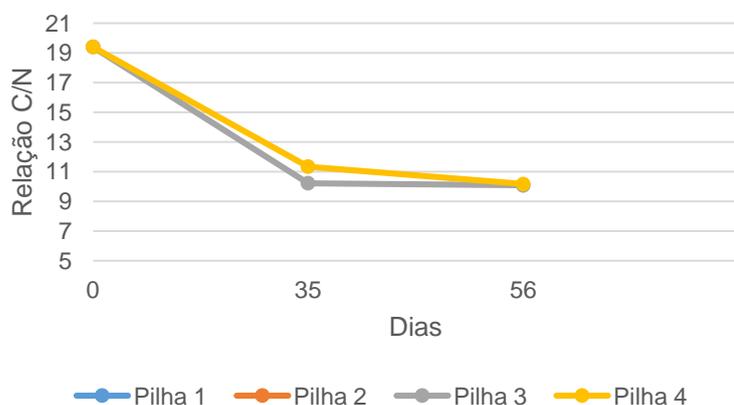
Fonte: Do autor, 2019

Nos experimentos de compostagem com os resíduos urbanos também foi mantida a faixa ótima proposta por Merckel (1981), ou seja, entre 40 e 60%. Havendo valores próximos ou inferiores a 40% era realizada a irrigação da massa de maneira que a umidade aumentasse, assim como nos experimentos de Cordeiro (2010).

Estudos anteriores como os de Cordeiro (2010), Silva (2016) e Carli (2010), obtiveram resultados parecidos, com oscilações de umidade devido à ação dos microrganismos, que foram controladas com irrigações quando necessárias.

No Gráfico 8 estão relacionados os resultados da relação C/N obtidos para os experimentos de compostagem com os resíduos urbanos.

Gráfico 8 - Relação C/N na compostagem dos resíduos urbanos



Fonte: Do autor, 2019

Considerando os intervalos para início de compostagem propostos por Vallini (1995), que deve se situar entre 25:1 e 30:1, vale destacar que os valores compreendidos entre 20:1 e 40:1 constituem o intervalo de compatibilidade, ainda segundo este autor.

Nos experimentos com os resíduos urbanos as pilhas 1 e 2 iniciaram próximas a 35:1, e as pilhas 3 e 4 próximas a 20:1, ou seja, todas as 4 pilhas iniciaram os experimentos com a relação C/N dentro do intervalo de compatibilidade.

Neste experimento a relação C/N atingiu 10:1 por volta dos 35 dias para as pilhas 3 e 4, e em torno dos 56 dias para as demais pilhas, o que segundo Kiehl (1998) garante a estabilização dos compostos.

Experimentos anteriores de Cordeiro (2010), Silva (2016) e Carli (2010) que também realizaram estudos com compostagem em pilhas, também utilizaram o parâmetro da relação C/N para estabelecer a estabilização das pilhas quando essas atingissem tal relação em torno de 10:1.

Portanto as pilhas 3 e 4 foram mais eficientes no tempo de estabilização do composto (potencializando o processo), no qual a pilha 1 (controle) e a pilha 2 (aerada sem fertilizante químico) indicaram uma estabilização mais lenta, 21 dias após as pilhas 3 e 4.

Ao final da estabilização dos compostos, a massa final de cada uma das pilhas foi medida. Os resultados dessa medição encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Massa das pilhas ao final da compostagem dos resíduos urbanos

Pilha	Massa inicial (Kg)	Massa final (Kg)	% de redução
1	108	33	69,44
2	108	35	67,59
3	110,16	36	67,27
4	110,16	30	72,72

Fonte: Do autor, 2019

A média de redução da massa das pilhas foi de 69,25% o que confirma novamente com o quão importante pode ser esse processo no tratamento dos resíduos orgânicos.

Assim como nos experimentos com os resíduos industriais, os resultados dos experimentos com resíduos urbanos também vêm de encontro ao proposto por Massukado (2008), no qual é afirmado que o processo de compostagem consegue proporcionar uma redução média de até 60% do volume total das pilhas.

5.2 APLICAÇÃO DOS COMPOSTOS EM ALFACES

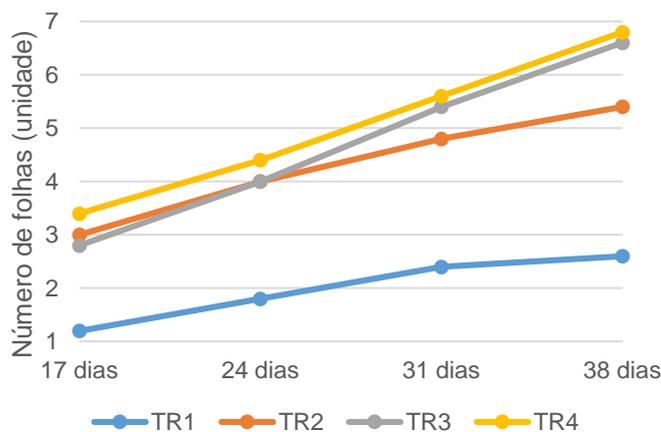
5.2.2 Aplicação em condições naturais

Como detalhado no item 4.2.1 na aplicação dos compostos na cultura de alfaces (*Lactuca sativa L.*), a quantidade requerida de composto orgânico em cada recipiente foi calculada e encontrada a quantidade de 31,4 g de composto.

A Tabela do Manual de Adubação Orgânica de Hortaliças e Frutíferas (INSTITUTO AGRONÔMICO, 2013) estabelece a quantidade de 4 kg. m⁻² de composto orgânico para a cultura de alfaces. Foi essa quantia de composto utilizada na equação 3.

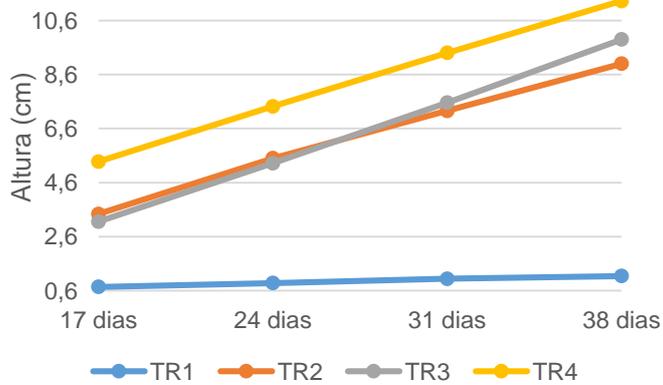
As médias dos resultados obtidos para os compostos dos resíduos industriais na primeira rodada dos experimentos encontram-se plotadas nos Gráficos 9 (NF), 10 (AP), 11 (MF) e 12 (MS).

Gráfico 9 - Número de folhas nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais



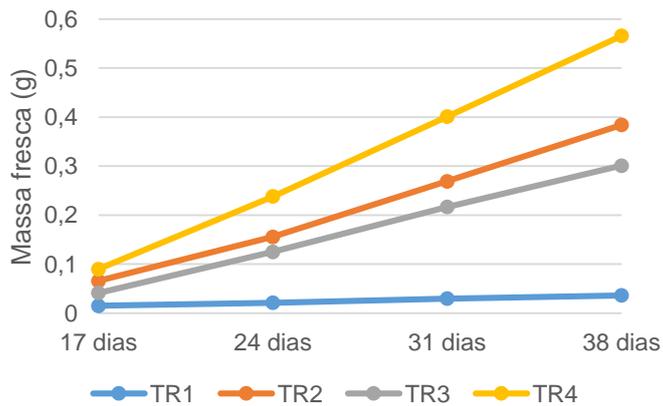
Fonte: Do autor, 2019

Gráfico 10 - Altura média nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais



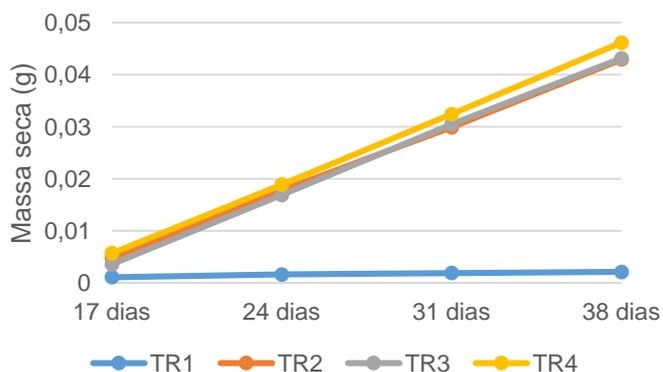
Fonte: Do autor, 2019

Gráfico 11 - Massa da matéria seca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais



Fonte: Do autor, 2019

Gráfico 12 - Massa da matéria fresca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais



Fonte: Do autor, 2019

Os valores de F , $F_{crítico}$ e p para todos os testes de ANOVA realizados encontram-se na Tabela 3, bem como sua análise estatística.

Tabela 3 - Resultados dos testes de ANOVA

Teste (etapa – parâmetro)	F	$F_{crítico}$	$F_{crítico} < F$	p	α	$p < \alpha$
17 dias - NF	10,98039	3,238	Sim	0,000367	0,05	Sim
24 dias - NF	18,62222	3,238	Sim	$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,05	Sim
31 dias - NF	39,45455	3,238	Sim	$1,28 \cdot 10^{-7}$	0,05	Sim
38 dias - NF	68,06061	3,238	Sim	$2,51 \cdot 10^{-9}$	0,05	Sim
17 dias - AP	24,20952	3,238	Sim	$3,45 \cdot 10^{-6}$	0,05	Sim
24 dias - AP	73,12214	3,238	Sim	$1,48 \cdot 10^{-9}$	0,05	Sim
31 dias - AP	408,6893	3,238	Sim	$2,52 \cdot 10^{-15}$	0,05	Sim
38 dias - AP	381,063	3,238	Sim	$4,37 \cdot 10^{-15}$	0,05	Sim
17 dias - MF	7,590509	3,238	Sim	0,002233	0,05	Sim
24 dias - MF	8,697209	3,238	Sim	0,001184	0,05	Sim
31 dias - MF	59,23861	3,238	Sim	$6,96 \cdot 10^{-9}$	0,05	Sim
38 dias - MF	102,4554	3,238	Sim	$1,17 \cdot 10^{-10}$	0,05	Sim
17 dias - MS	5,350454	3,238	Sim	0,009593	0,05	Sim
24 dias - MS	6,595835	3,238	Sim	0,004134	0,05	Sim
31 dias - MS	38,24414	3,238	Sim	$1,59 \cdot 10^{-7}$	0,05	Sim
38 dias - MS	135,3533	3,238	Sim	$1,4 \cdot 10^{-11}$	0,05	Sim

Fonte: Do autor, 2019

Os resultados dispostos na Tabela 3 indicam que tanto para a análise de ($F_{crítico} < F$) como para ($p < \alpha$) deve-se aceitar com nível de 5% de significância que existe diferença entre os tratamentos TR (1), TR (2), TR (3) e TR (4).

O TR (1) obteve resultados muito abaixo dos outros tratamentos como pode ser observado nos Gráficos 9 a 12, apontando que o tratamento controle (somente solo) não é eficiente na cultura de alface, coincidindo com os resultados de Gonçalves et al. (2014).

Diante do baixo desempenho do TR (1) foi aplicado o mesmo teste ANOVA somente para os seguintes tratamentos: TR (2), TR (3) e TR (4). Os valores de F ,

$F_{crítico}$ e p para esse teste de ANOVA encontram-se na Tabela 4, bem como sua análise estatística.

Tabela 4 - Resultados dos testes de ANOVA sem o TR (1)

Teste (etapa - parâmetro)	F	$F_{crítico}$	$F_{crítico} < F$	p	α	$p < \alpha$
17 dias - NF	2,8	3,885	Não	0,100464	0,05	Não
24 dias - NF	2,666667	3,885	Não	0,110102	0,05	Não
31 dias - NF	3,25	3,885	Não	0,074483	0,05	Não
38 dias - NF	10,75	3,885	Sim	0,002113	0,05	Sim
17 dias - AP	8,759888	3,885	Sim	0,004512	0,05	Sim
24 dias - AP	11,11099	3,885	Sim	0,001859	0,05	Sim
31 dias - AP	33,78859	3,885	Sim	$1,18 \cdot 10^{-5}$	0,05	Sim
38 dias - AP	19,69482	3,885	Sim	0,000162	0,05	Sim
17 dias - MF	3,473238	3,885	Não	0,064553	0,05	Não
24 dias - MF	2,798205	3,885	Não	0,100587	0,05	Não
31 dias - MF	17,29213	3,885	Sim	0,000292	0,05	Sim
38 dias - MF	29,39472	3,885	Sim	$2,37 \cdot 10^{-5}$	0,05	Sim
17 dias - MS	1,217435	3,885	Não	0,330073	0,05	Não
24 dias - MS	0,075016	3,885	Não	0,92816	0,05	Não
31 dias - MS	0,23976	3,885	Não	0,790497	0,05	Não
38 dias - MS	0,752694	3,885	Não	0,49209	0,05	Não

Fonte: Do autor, 2019

Os resultados demonstrados na Tabela 4 são mais robustos que os anteriormente analisados na Tabela 3. Pode-se verificar que há diferença entre TR (2), TR (3) e TR (4) em alguns parâmetros analisados e etapas experimentais.

Para o parâmetro NF há diferença entre esses 3 tratamentos apenas aos 38 dias de experimento. TR (3) e TR (4) possuem médias próximas de NF (Gráfico 9) após os 31 dias de experimento, deixando o TR (2) com valores menores. Isso indica uma eficiência maior dos tratamentos 3 e 4 no resultado de NF em detrimento do tratamento 2 (composto comercial).

Gonçalves et al. (2014) não encontraram diferença estatística para NF entre o composto orgânico de resíduos e o comercial, este estudo não utilizou composto de resíduos com fertilizantes. Corroborando com os resultados das três primeiras análises deste estudo.

Já para o parâmetro AP desde o início da análise (17 dias) é indicada diferença entre os tratamentos. Examinando o Gráfico 10 vê-se que TR (2) e TR (3) possuem médias bem parecidas para todas as etapas do experimento, porém TR (4) possui médias superiores. Este fato aponta que TR (4) (composto das pilhas 3 e 4) obteve mais êxito no desenvolvimento da altura das plantas (AP).

Estes resultados corroboram com os estudos de Gonçalves et al. (2014) e Medeiros et al. (2008), nos quais o composto orgânico produzido a partir de resíduos também se mostrou mais eficaz estatisticamente no parâmetro AP.

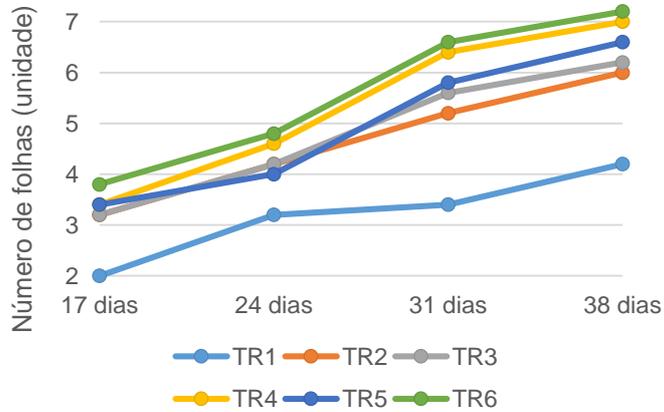
No parâmetro MF a partir dos 31 dias de experimento é aceito que há diferença entre os tratamentos. Explorando o Gráfico 11 é perceptível que as médias de MF para o TR (4) são superiores aos outros tratamentos, preconizando que este tratamento é mais eficiente na análise de MF. Gonçalves et al. (2014) e Medeiros et al. (2008) também tiveram como resultado melhor desempenho o composto orgânico produzido a partir de resíduos para MF.

No último parâmetro analisado, MS, a ANOVA não indica diferença entre os tratamentos testados. Investigando o Gráfico 12 é visto que TR (4) possui médias ligeiramente superiores aos outros tratamentos., ou seja, mesmo não havendo diferença estatística nesse parâmetro, indica-se o TR (4) como tratamento mais eficaz pois este obteve diferenças estatísticas nos outros 3 parâmetros testados.

Câmara (2001), assim como Gonçalves et al. (2014), em seus experimentos observaram a superioridade dos compostos orgânicos produzidos a partir de resíduos na produção de alfaces quando comparados a compostos comerciais. Câmara (2001) afirma ainda que, os compostos orgânicos usados como substrato na produção de mudas de alface podem substituir com sucesso os substratos comerciais, sendo economicamente viáveis.

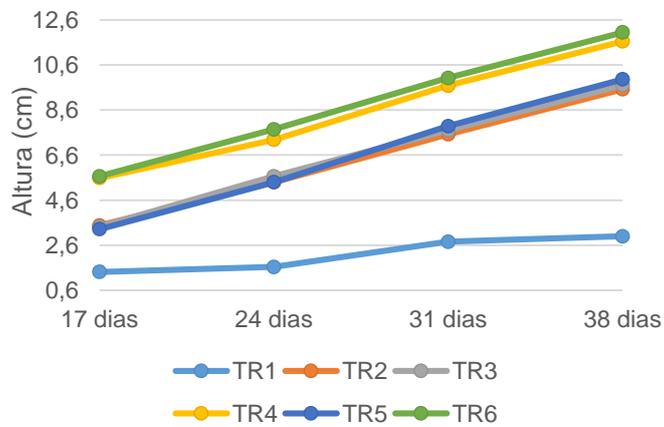
Os resultados da segunda rodada de experimentos em condições naturais com os compostos industriais e urbanos estão dispostos nos Gráficos 13 a 16.

Gráfico 13 - Número de folhas nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos



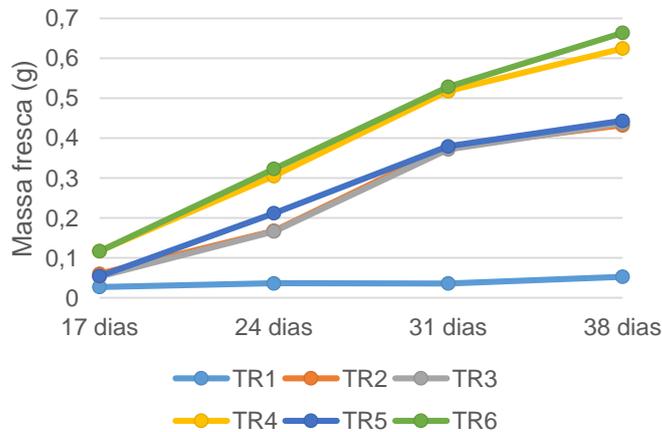
Fonte: Do autor, 2019

Gráfico 14 - Altura média nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos



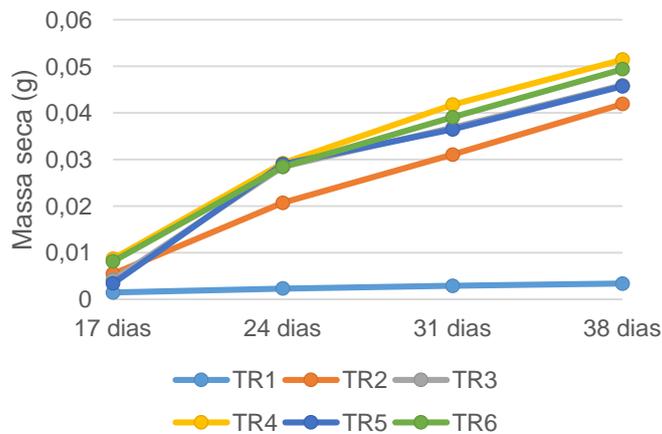
Fonte: Do autor, 2019

Gráfico 15 - Massa da matéria fresca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos



Fonte: Do autor, 2019

Gráfico 16 - Massa da matéria seca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos



Fonte: Do autor, 2019

Os valores de F , $F_{crítico}$ e p para todos os testes realizados nessa segunda rodada encontram-se na Tabela 5, juntamente com a sua análise estatística. Salienta-se que nesse caso os testes de ANOVA já foram logo realizados sem o TR (1), pois este tratamento apresentou resultados muito menores em comparação com TR (2), TR (3), TR (4), TR (5) e TR (6).

Tabela 5 - Resultados dos testes de ANOVA sem o TR (1) na segunda rodada de experimentos

Teste (etapa - parâmetro)	<i>F</i>	<i>F</i>_{crítico}	<i>F</i>_{crítico} < <i>F</i>	<i>p</i>	<i>α</i>	<i>p</i> < <i>α</i>
17 dias - NF	1,250	2,866	Não	0,322122	0,05	Não
24 dias - NF	1,125	2,866	Não	0,372784	0,05	Não
31 dias - NF	4,611	2,866	Sim	0,008418	0,05	Sim
38 dias - NF	2,907	2,866	Sim	0,043451	0,05	Sim
17 dias - AP	9,266	2,866	Sim	0,000201	0,05	Sim
24 dias - AP	22,239	2,866	Sim	3,97.10 ⁻⁷	0,05	Sim
31 dias - AP	51,132	2,866	Sim	3,1.10 ⁻¹⁰	0,05	Sim
38 dias - AP	19,057	2,866	Sim	1,34.10 ⁻⁶	0,05	Sim
17 dias - MF	6,148	2,866	Sim	0,002144	0,05	Sim
24 dias - MF	10,337	2,866	Sim	0,000104	0,05	Sim
31 dias - MF	22,266	2,866	Sim	3,94.10 ⁻⁷	0,05	Sim
38 dias - MF	25,116	2,866	Sim	1,48.10 ⁻⁷	0,05	Sim
17 dias - MS	0,815	2,866	Não	0,530372	0,05	Não
24 dias - MS	1,172	2,866	Não	0,352745	0,05	Não
31 dias - MS	1,823	2,866	Não	0,163828	0,05	Não
38 dias - MS	2,307	2,866	Não	0,093526	0,05	Não

Fonte: Do autor, 2019

No parâmetro NF, há diferença entre os 5 tratamentos a partir dos 31 dias de experimento. TR (4) e TR (6) possuem médias próximas de NF (Gráfico 13), e a partir de 31 dias de experimento essas médias tornam-se ligeiramente superiores aos outros tratamentos. Tal fato indica uma eficiência maior dos tratamentos 4 e 6 no resultado de NF em comparação aos outros tratamentos.

Como TR (4) e TR (6) são tratamentos com os compostos orgânicos que possuíam fertilizante, os resultados para NF corroboram com os obtidos pelos experimentos de Câmara (2001).

Para o parâmetro AP desde o início da análise (17 dias) é indicada diferença entre os 5 tratamentos testados. Explorando o Gráfico 14 vê-se que TR (2), TR (3) e TR (5) possuem médias bem parecidas para todas as etapas do experimento, sendo

que TR (4) e TR (6) possuem médias superiores quando comparadas às médias dos outros tratamentos. Portanto, os tratamentos 4 e 6 obtiveram mais êxito no desenvolvimento da altura das plantas (AP).

Estudos de Gonçalves et al. (2014) e Medeiros et al. (2008), também demonstraram que o composto orgânico produzido a partir de resíduos se mostrou mais eficaz estatisticamente no parâmetro AP.

Na análise do parâmetro MF desde o início é aceito que há diferença entre os tratamentos. Examinando o Gráfico 15 é perceptível que as médias de MF para o TR (4) e TR (6) são superiores aos outros tratamentos, confirmando que estes tratamentos são mais eficientes na análise de MF.

Gonçalves et al. (2014) e Medeiros et al. (2008) também tiveram como resultado melhor desempenho o composto orgânico produzido a partir de resíduos para MF.

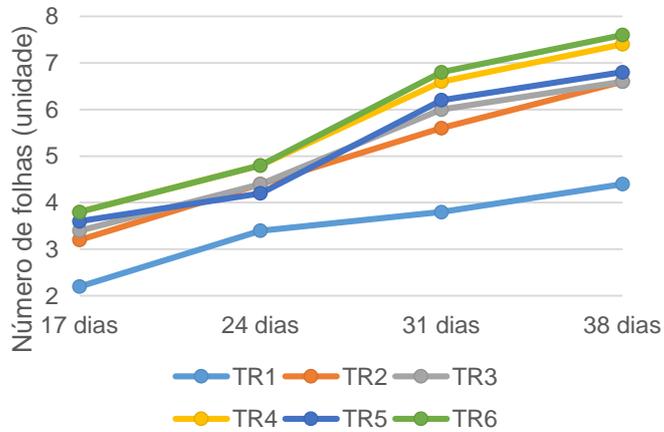
Em MS, a ANOVA não indica diferença entre os tratamentos. Examinando mais minuciosamente os resultados observa-se que conforme as etapas experimentais avançam, o valor de F vai gradativamente aumentando, aproximando de $F_{crítico}$. De maneira análoga o valor de p vai diminuindo, e assim, se aproximando de α . Esse exame pode apontar que se houvesse mais etapas experimentais a ANOVA indicaria diferença entre os tratamentos. Investigando o Gráfico 16 é visto que TR (4) e TR (6) possuem médias ligeiramente superiores aos outros tratamentos, apontando mais uma vez esses tratamentos como os mais eficazes.

O estudo de Gonçalves et al. (2014) demonstrou que para MS houve diferença estatística entre os tratamentos com o composto comercial e com composto orgânico produzido a partir de resíduos, o que vem ao encontro dos resultados deste estudo.

5.2.3 Aplicação em estufa

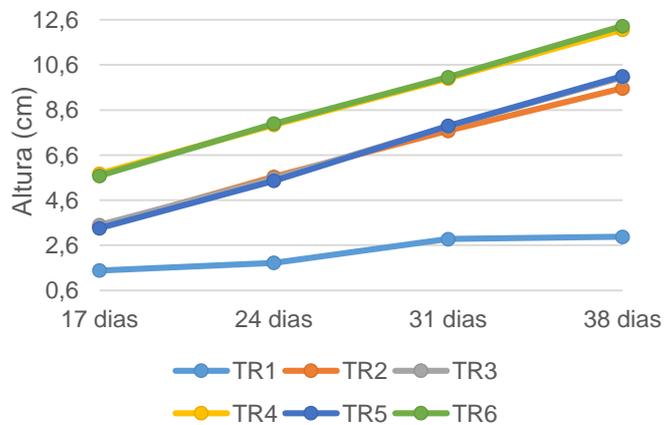
Paralelamente aos experimentos da segunda rodada em condições naturais foram realizados os experimentos em estufa para os 6 diferentes tratamentos, nos quais foram obtidos os resultados plotados nos Gráficos 17 a 20. A análise estatística está na Tabela 6, novamente foram excluídos os resultados de TR (1) pois estes se mostraram muito inferiores aos outros tratamentos realizados.

Gráfico 17 - Número de folhas nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos



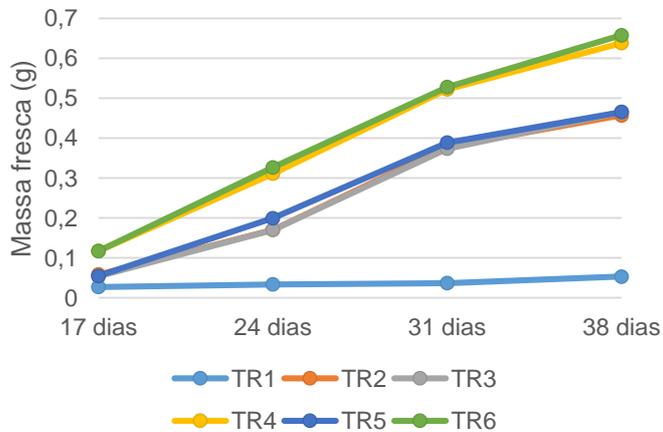
Fonte: Do autor, 2019

Gráfico 18 - Altura média nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos



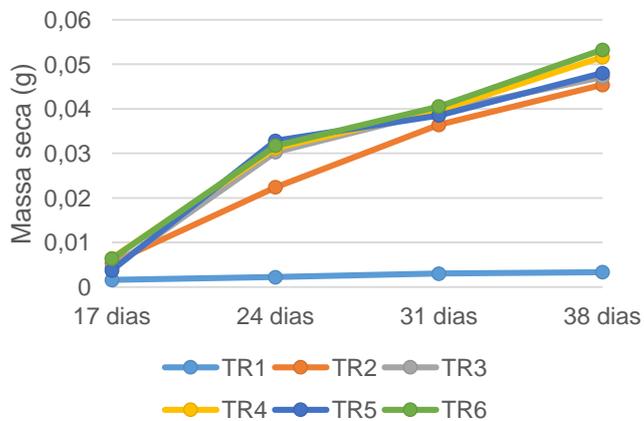
Fonte: Do autor, 2019

Gráfico 19 - Massa da matéria fresca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos



Fonte: Do autor, 2019

Gráfico 20 - Massa da matéria seca nos experimentos com o composto estabilizado dos resíduos industriais e urbanos



Fonte: Do autor, 2019

Tabela 6 - Resultados dos testes de ANOVA sem o TR (1) em estufa

Teste (etapa - parâmetro)	F	$F_{crítico}$	$F_{crítico} < F$	p	α	$p < \alpha$
17 dias - NF	1,416	2,866	Não	0,264735	0,05	Não
24 dias - NF	1,500	2,866	Não	0,239933	0,05	Não
31 dias - NF	2,280	2,866	Não	0,096501	0,05	Não
38 dias - NF	2,894	2,866	Sim	0,048454	0,05	Sim

17 dias - AP	9,624	2,866	Sim	0,000165	0,05	Sim
24 dias - AP	20,743	2,866	Sim	$6,91.10^{-7}$	0,05	Sim
31 dias - AP	44,530	2,866	Sim	$1,09.10^{-9}$	0,05	Sim
38 dias - AP	21,380	2,866	Sim	$4,69.10^{-6}$	0,05	Sim
17 dias - MF	6,383	2,866	Sim	0,001766	0,05	Sim
24 dias - MF	10,802	2,866	Sim	$7,88.10^{-5}$	0,05	Sim
31 dias - MF	22,637	2,866	Sim	$3,45.10^{-7}$	0,05	Sim
38 dias - MF	30,410	2,866	Sim	$3,02.10^{-8}$	0,05	Sim
17 dias - MS	1,549	2,866	Não	0,226231	0,05	Não
24 dias - MS	3,541	2,866	Sim	0,024318	0,05	Sim
31 dias - MS	2,968	2,866	Sim	0,049072	0,05	Sim
38 dias - MS	4,703	2,866	Sim	0,007716	0,05	Sim

Fonte: Do autor, 2019

Para o primeiro parâmetro analisado, NF, há diferença entre os 5 tratamentos na última etapa experimental, ou seja, com 38 dias. Como TR (4) e TR (6) possuem médias próximas de NF (Gráfico 17), que são ligeiramente superiores aos outros tratamentos, indica-se que há mais eficácia nos tratamentos 4 e 6 no resultado de NF em comparação aos outros.

Os tratamentos TR (4) e TR (6) são com compostos orgânicos que possuíam fertilizante, o que corrobora com os resultados obtidos pelos experimentos de Câmara (2001).

No parâmetro AP desde o início da análise em estufa (17 dias), é apontada diferença entre os 5 tratamentos. No Gráfico 18 vê-se que os tratamentos 2, 3 e 5, e os tratamentos 4 e 6 possuem médias bem parecidas para todas as etapas do experimento. Porém TR (4) e TR (6) possuem médias superiores quando comparadas às médias dos outros tratamentos, o que indica que os tratamentos 4 e 6 alcançaram mais eficiência no desenvolvimento de AP.

Para Gonçalves et al. (2014) e Medeiros et al. (2008), resultados semelhantes foram demonstrados, ou seja, os compostos produzidos a partir de resíduos obtiveram médias estaticamente superiores aos outros tratamentos.

Em MF nos experimentos realizados em estufa, desde o início é aceito que há diferença entre os tratamentos. Explorando o Gráfico 19 é visto que as médias de MF

para o TR (4) e TR (6) são superiores aos outros tratamentos, apontado que estes tratamentos são mais eficazes na análise de MF.

Os estudos de Gonçalves et al. (2014) e Medeiros et al. (2008) também alcançaram como resultado que o composto orgânico produzido a partir de resíduos possui melhor desempenho para MF.

Diferentemente dos resultados da primeira e segunda rodadas em condições naturais, os resultados para MS em estufa indicaram diferença entre os tratamentos a partir de 24 dias de experimento. Pode-se observar no Gráfico 20 que os tratamentos 4 e 6 possuem médias um pouco superiores aos outros tratamentos, indicando que esses tratamentos em estufa são os melhores para o parâmetro MS.

O estudo de Gonçalves et al. (2014) também demonstrou que para MS houve diferença estatística entre os tratamentos com o composto comercial e com composto orgânico produzido a partir de resíduos, o que vem de encontro com o resultado desse estudo.

Gonçalves et al. (2014), Medeiros et al. (2008) e Câmara (2001) de forma geral chegaram a resultados muito parecidos, ou seja, para todos os parâmetros analisados eles indicam maior eficácia no crescimento de espécies vegetais quando são utilizados como adubação compostos produzidos a partir de resíduos sólidos.

5.3 DIMENSIONAMENTO DO PÁTIO DE COMPOSTAGEM

5.3.1 Dimensionamento do pátio de compostagem convencional

Para o dimensionamento do pátio de compostagem convencional como exposto no item 4.3.1, inicialmente é necessário o estudo gravimétrico do município para o qual o pátio será dimensionado. Aqui nesse estudo foram utilizados os dados do município de Uberaba.

A produção de resíduos sólidos em Uberaba é em média 297 t. dia⁻¹ (SENE; SOUZA; MARINO, 2015), assim a produção anual de resíduos no município é de aproximadamente 108.405 toneladas anuais. Considerando os percentuais da composição gravimétrica em massa do município, pode-se calcular a quantidade de cada tipo de resíduo (equação 4). A Tabela 7 apresenta a composição gravimétrica dos resíduos do município de Uberaba – MG.

Tabela 7 - Estudo gravimétrico do município de Uberaba

Tipo de resíduo	Percentual*	Quantidade anual em Uberaba
Matéria orgânica	58%	62.874,9 (t. ano ⁻¹)
Metais	4 %	4.336,2 (t. ano ⁻¹)
Papelão, papel e Tetra Pak	17,5 %	18.970,8 (t. ano ⁻¹)
Plástico	11%	11.924,5 (t. ano ⁻¹)
Vidro	2%	2.168,1 (t. ano ⁻¹)
Outros	7,5%	8.130,4 (t. ano ⁻¹)

Fonte: * Sene; Souza; Marino, 2015

Considerando a quantidade de 62.874,9 t. ano⁻¹ de resíduos orgânicos no município, temos que são gerados 172,26 t. dia⁻¹, essa será a quantidade de partida utilizada no dimensionamento.

A densidade dos resíduos que serão encaminhados para a compostagem possui o peso específico igual a 550 kg. m⁻³ (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2010). Além deste parâmetro, deve-se adotar o valor da relação de C/N que varia de 25 a 30 para resíduos sólidos urbanos. Também, define-se a altura da leira que varia de 1,2 a 1,8 metro e a dimensão da base que varia de 2 a 4 metros (NUCASE, 2007). As adoções são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros adotados para o dimensionamento

Relação C/N	h (m)	L (m)	Área da secção (m²)	Peso específico (kg. m⁻³)
25/1	1,80	3,50	3,15	550

Fonte: Do autor, 2019

Adotando-se a relação C/N igual a 25:1 se dispensa a necessidade de acrescentar materiais ricos em carbono e/ou nitrogênio (dispensando também o uso da equação 5), pois segundo Vallini (1995) o intervalo ótimo da relação C/N para o início da compostagem se situa entre 25:1 a 30:1.

O volume de resíduos a serem compostados fica igual a 313,2 m³. O comprimento da leira que será montada por dia no pátio, tem aproximadamente 99,43 m.

Considerando que a estabilização total do composto segundo Cerri et al. (2008) varia de 90 a 120 dias, a quantidade de leiras do pátio será igual a este tempo. Além disso, adiciona-se 10% do total de área de operação para circulação, segurança,

equipamentos e áreas de trabalho. Assim os resultados do dimensionamento encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do dimensionamento do pátio convencional

t_{compostagem} (dias)	A_{leiras} (m²)	Espaçamento (m²)	A_{segurança}(m²)	A_{total} (ha)
90	31320,45	31320,45	3132,045	6,58

Fonte: Do autor, 2019

5.3.1 Dimensionamento do pátio de compostagem potencializado

Para o pátio de compostagem potencializado foram utilizados os mesmos dados gravimétricos dispostos na Tabela 8 e as mesmas adoções da Tabela 9. Assim a leira continua com os 99,43 m de comprimento, sendo a diferença na quantidade de dias para a estabilização do composto. Conforme o resultado dos experimentos realizados será adotado 35 dias (item 5.1).

Utilizando as equações 9 e 11 tem-se os resultados para este dimensionamento na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do dimensionamento do pátio potencializado

t_{compostagem} (dias)	A_{leiras} (m²)	Espaçamento (m²)	A_{segurança}(m²)	A_{total} (ha)
35	12180,175	3480,05	1218,0175	1,69

Fonte: Do autor, 2019

Portanto o pátio de compostagem para o município de Uberaba utilizando os métodos potencializados por este estudo, teria que possuir uma área de 1,69 ha, uma redução de 74,32% na área quando comparado ao método convencional de compostagem. Este fato evidencia a aplicabilidade do processo potencializado na economia de tempo, mão-de-obra, recursos financeiros e área de instalações, além de fornecer ao final um composto com maior teor de nutrientes.

6 CONCLUSÃO

O processo de compostagem é atualmente uma alternativa viável para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos do ponto de vista ambiental e social. Apesar de ser um processo natural, para que ele ocorra de maneira eficiente é necessário o controle de diversos parâmetros: granulometria do substrato inicial, temperatura, pH, umidade, oxigenação, relação C/N e organismos.

Conclui-se que a pilha 3 (aeração facilitada e adição de fertilizante químico), tanto para os resíduos industriais como para os resíduos urbanos, foi a mais eficiente por possuir menor tempo de estabilização, não necessitar de revolvimento manual e aumentar o teor de nutrientes do composto final.

A aplicação dos compostos no cultivo de alfaces mostrou que o tratamento 4 e o tratamento 6 (com o composto das pilhas 3 e 4) foram os mais eficazes, corroborando com o resultado do processo de compostagem. O pátio de compostagem potencializado necessita de uma área 74,32% menor que o convencional, viabilizando a aplicação da compostagem.

Esses resultados confirmam como a gestão de resíduos pode se beneficiar com o uso da compostagem como tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos, diminuindo o envio de resíduos para o aterro, o que acarreta na dilatação da vida útil. Esse tratamento dos resíduos sólidos também produz um composto eficaz na correção de solos para aplicação direta na agricultura.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo. Brasil, 2012.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo. Brasil, 2016.

ALBUQUERQUE, P. E. P. **Estratégias de Manejo de Irrigação: Exemplos de Cálculo**. Circular técnica – EMBRAPA. ISSN 1518-4269. Sete Lagoas. Brasil, 2010.

ASSOCIATION OF CITIES REGIONS FOR RECYCLING AND SUSTAINABLE RESOURCE MANAGEMENT - ACR. **Gestão dos resíduos domésticos biodegradáveis: Que perspectivas para as autoridades locais europeias?** 2005. 126 p. Disponível em:<http://www.rcc.gov.pt/SiteCollectionDocuments/Guia-Gest-res-dombiodegrad_2005.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2019.

AWASTHI, M. K.; PANDEY, A. K.; KHAN, J.; BUNDELA, P. S.; WONG, J. W. C.; SELVAM, A. **Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solidwaste composting.** Bioresource Technology 168 (2014) 214–221. Jabalpur. Índia, 2014.

BATISTA, J.G.F., BATISTA, E.R.B. **Compostagem – Utilização em horticultura.** Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo, 252 pp. Açores. Portugal, 2007.

BENITES, V. M.; CORREA, J. C.; MENEZES, J. F. S.; POLIDORO, J. C. **Produção de fertilizante organomineral granulado a partir de dejetos de suínos e aves no Brasil.** XXIX Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Guarapari. Brasil, 2010.

BRITO, L.M.C.M. **Manual de Compostagem.** Escola Superior Agrária de Ponte de Lima, Instituto Superior de Viana do Castelo. Viana do Castelo. Portugal, 2005.

CÂMARA, M. J. T. **Diferentes compostos orgânico e Plantmax como substratos na produção de mudas de alface.** 32 p Monografia (Graduação) – Escola Superior de Agricultura de Mossoró. Mossoró. Brasil, 2001.

CARLI, S. T. **Uso de degradadores biológicos na aceleração do processo de compostagem dos resíduos orgânicos vegetais e palhas de embalagem – estudo de caso na Ceasa-Curitiba.** Trabalho de conclusão de curso - Universidade Tuiuti do Paraná. Curitiba. Brasil, 2010.

CERRI, C. E.; OLIVEIRA, E. C. A.; SARTORI, R. H.; GARCEZ, T. B. **Compostagem.** Universidade de São Paulo. Piracicaba. Brasil, 2008.

CORDEIRO, N. M. **Compostagem de resíduos verdes e avaliação da qualidade dos compostos obtidos - caso de estudo da Algar S.A.** Dissertação de mestrado. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. Portugal, 2010.

CUNHA QUEDA, A.C.F. **Dinâmica do nitrogênio durante a compostagem de materiais biológicos putrescíveis.** Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agro-Industrial. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior de Agronomia. .257 pp. Lisboa. Portugal, 1999.

DIAS, B. O. **Estoque de carbono e quantificação de substâncias húmicas de latossolo sob aplicação continuada de lodo de esgoto. Caracterização da matéria orgânica de latossolo sob aplicação continuada de lodo de esgoto.** Cap. 2, p. 19-47. Dissertação (Mestrado em solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras. Lavras. Brasil, 2005.

DRZ GEOTECNOLOGIA E CONSULTORIA LTDA. **Prefeitura Municipal de Uberaba. Plano Municipal de Saneamento Básico: Diagnóstico Técnico Participativo.** 677 p. Uberaba. Brasil, 2013.

FRANCISCO, A. D. M. **Eficiência de fontes de nitrogênio e enxofre na composição Químico-Bromatológica e algumas características agronômicas da cultura de milho (Zea mays L.) em sistema de plantio direto.** Tese de doutorado – Universidade de São Paulo. Pirassununga. Brasil, 2008.

GONÇALVES, M. S. [et al.]. **Produção de mudas de alface e couve utilizando composto proveniente de resíduos agroindustriais.** Rev. Bras. de Agroecologia. 9(1): 216-224. Campo Mourão. Brasil, 2014.

Holanda - Fabricante de compostos orgânicos. **Parâmetros do composto comercializado como terra vegetal.** Rio Claro. Brasil, 2018.

INSTITUTO AGRONÔMICO. **Adubação Orgânica de Hortaliças e Frutíferas.** Campinas. Brasil, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sinopse do censo demográfico de 2010**. Uberaba 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=31&dados=8>>. Acesso em: 13 jan. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Dados climatológicos de Uberaba**. Brasília. Brasil, 2019.

JIANG, T.; SCHUCHARDT, F.; LI, G.; GUO, R.; ZHAO, Y. **Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting**. Journal of Environmental Sciences 2011, 23(10) 1754–1760. China, 2011.

KIEHL, E. J. **Manual de Compostagem: maturação e qualidade do composto**. Piracicaba, E. J. Kiehl, Piracicaba. Brasil, 1998.

Laboratório de análises de solo da FAZU (Faculdades Associadas de Uberaba). **Relatório de resultados de análises**. Uberaba. Brasil, 2019.

LOPÉZ-REAL, J. **Parámetros de control del compostaje y aplicación del compostaje de residuos orgánicos**. In Gestión y Utilización de Residuos Urbanos para la Agricultura, Fundación “La Caixa”, Ed. Aedos, 61-67. 1995.

LOUREIRO, D. C.; AQUINO, A. M.; ZONTA, E.; LIMA, E. **Compostagem e vermicompostagem de resíduos domiciliares com esterco bovino para a produção de insumo orgânico**. Pesq. agropec. bras., v.42, n.7, p.1043-1048. Brasília. Brasil, 2007.

MASSUKADO, Luciana Miyoko. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares**. 204 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo. São Carlos. Brasil, 2008.

MEDEIROS, D.C.; FREITAS, K.C.S.; VERAS, F.S.; ANJOS, R.S.B.; BORGES, R.D.; CAVALCANTE NETO, J.G.; NUNES, G.H.S.; FERREIRA, H.A. **Qualidade de mudas de alface em função de substratos com e sem biofertilizante**. Horticultura Brasileira, v. 26, p.186- 189, Brasília. Brasil, 2008.

MERCKEL, A. J. **Managing livestock wastyes**. Westport: Avi Publishing Company, 1981.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. **Manual para Implantação de Compostagem e de Coleta Seletiva no Âmbito de Consórcios Públicos**. 75 p. Brasília. Brasil, 2010.

MUSCOPE, F. P. **Compostagem de resíduos agroindustriais através da inoculação de microrganismos eficientes: uma alternativa para a compostagem em pequena escala**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal da Fronteira do Sul. Erechim. Brasil, 2017.

MUSTIN, M. **Le compost Gestion de la matière organique**. Édition François Dubusc, 954 pp. Paris. França, 1987.

NÚCLEO SUDESTE DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL (NUCASE). Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Resíduos sólidos: processamento de resíduos sólidos orgânicos: guia do profissional em treinamento**.68 p. ReCESA. Belo Horizonte. Brasil, 2007.

PEREIRA NETO, João. **Manual de compostagem: processo de baixo custo**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Leeds. Inglaterra, 2007.

PEREIRA, L. A. A.; FIALHO, M. L. **Gestão da sustentabilidade: compostagem otimizada em resíduos sólidos orgânicos com a utilização de metodologia enzimática na implantação de uma usina de compostagem de lixo no município de Santa Juliana/MG**. Int. J. Knowl. Eng. Manage. v. 2, n. 2, p. 52-85. Florianópolis. Brasil, 2013.

PESSIN, F.; FINOTTI, C.P.; SCHEIDER, A.; Silva, V.; Hossaka, S.; Tell. A. PORTELLA, M. O.; RIBEIRO, J. C. J. **Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos**. Revista Direito Ambiental e sociedade, v. 4, n. 1 (p. 115-134). Belo Horizonte. Brasil, 2014.

PORTELLA, M. O.; RIBEIRO, J. C. J.; **Aterros sanitários: aspectos gerais e destino final dos resíduos**. Revista Direito Ambiental e sociedade, v. 4, n. 1, (p. 115-134). Belo Horizonte. Brasil, 2014.

RODRIGUES, E. Q.; BARREIRA, L. P.; KOVACS, A. **Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos**. Bioresource Technology, v. 78, n. 3, p.301-308, Botucatu. Brasil, 2006.

RUSSO, M.A.T. **Introdução à compostagem de resíduos sólidos**. Escola Superior de tecnologia e Gestão, Instituto Superior Politécnico de Viana do Castelo, 81 pp. Viana de Castelo. Portugal, 2004.

SENE, A. F.; SOUZA, A. D.; MARINO, J. P. B. **Avaliação da geração de resíduos sólidos urbanos destinados ao aterro sanitário municipal da cidade de Uberaba – MG**. Revista INOVA IFTM. Uberaba. Brasil, 2015.

SILVA, A. S. F. **Avaliação do processo de compostagem com diferentes proporções de resíduos de limpeza urbana e restos de alimentos**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil, 2016.

Soma Ambiental. **Relatório de análises de solo**. Uberaba. Brasil, 2018.

VALLINI, G. **Il Compostaggio**. In: La protezione dell'ambiente in Italia. Ed. Bertini, I., Cipollini, R., Tundo, P. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Società Chimica Italiana e Consorzio Interuniversitario Chimica per l'Ambiente. 83-134 pp. Bologna. Itália, 1995.

XIAO, R. [et.al.]. **Continuous thermophilic composting (CTC) for rapid biodegradation and maturation of organic municipal solid waste.** Revista Bioresource Technology. V. 100 (4807–4813). Yangling, China, 2009.

XIAO, R. [et.al.]. **Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: A review.** Revista Bioresource Technology. Yangling, China, 2017.

ZUCCONI, F.; DE BERTOLDI, M. **Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste.** In: Compost: production, quality and use. Ed. De Bertoldi, M., Ferranti, M.P., L'Hermite, P., Zucconi, F., Elsevier Applied Science Publishers Ltd. 1987.