

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS
BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

YAHY DE MENEZES CAMBOIM

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA COMPOSTAGEM COM
AERAÇÃO FORÇADA EM PEQUENA ESCALA**

Porto Alegre

2019

YAHY DE MENEZES CAMBOIM

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA COMPOSTAGEM COM
AERAÇÃO FORÇADA EM PEQUENA ESCALA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Darci Barnech Campani

**Porto Alegre
2019**

FOLHA DE APROVAÇÃO

YAHY DE MENEZES CAMBOIM

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA COMPOSTAGEM COM AERAÇÃO FORÇADA EM PEQUENA ESCALA

Monografia aprovada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Darci Barnech Campani - Orientador – Escola de Engenharia– UFRGS

Prof. Dieter Wartchow – Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS

Prof^a. Teresinha Guerra – Instituto de Biociências - UFRGS

Porto Alegre, dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

À família, por toda a disposição, apoio e suporte prestados a qualquer momento, em especial à minha vó Beth, corresponsável por qualquer conquista minha.

Aos amigos, por me ajudarem a manter o equilíbrio quando o compromisso acadêmico sobrecarregava outras áreas de vida.

À UFRGS e ao Instituto de Biociências, que me propiciaram um aprendizado diversificado e intenso durante a graduação.

A todos da equipe do LEAMet que contribuíram e me oportunizaram a realização deste trabalho, incluindo o Prof. Campani, que aceitou me orientar ainda no início deste ano.

RESUMO

No Brasil, menos de 5% dos Resíduos Sólidos Urbanos são destinados a processos capazes de reincorporar estes resíduos à cadeia produtiva, como a compostagem. A compostagem pode ser definida como um processo de decomposição da matéria orgânica em condições relativamente controladas, realizada por microrganismos de metabolismo aeróbico. O método de compostagem com aeração forçada consiste em dispor o material a ser decomposto sobre um sistema mecanizado de injeção de ar, não necessitando de reviramento manual e acelerando o processo de decomposição aeróbica. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de compostagem com aeração forçada em escala laboratorial, visando a subsidiar a realização de ensaios científicos futuros sobre este método de compostagem. Para isso, foi realizada a montagem de um protótipo com duas bombonas de plástico de 200 L conectadas a sopradores de ar, sendo definidos critérios de operação, seguida pela execução de um ciclo de compostagem com determinação de parâmetros do material orgânico, avaliando a viabilidade da metodologia em reproduzir as condições gerais do processo de compostagem. O material apresentou atividade microbiológica durante o período de aeração, mantendo-se na faixa mesofílica de temperatura. Apesar de apresentar umidade e relação C/N ideais inicialmente, estes parâmetros não se mantiveram em valores ideais até o final do processo. O protótipo mostrou-se com potencial para a reprodução do processo de compostagem com aeração forçada em pequena escala, necessitando, entretanto, de aprimoramentos em alguns aspectos.

Palavras-chave: Compostagem. Aeração forçada. Leiras estáticas aeradas. Compostagem escala laboratorial. Resíduos Sólidos Urbanos. Gerenciamento de resíduos orgânicos.

ABSTRACT

In Brazil, less than 5% of Municipal Solid Wastes go through processes capable of reincorporating these residues to the supply chain such as composting. Composting is a process of controlled decomposition of organic matter, which is mediated by aerobic microorganisms. Aerated static pile composting is a method in which materials being decomposed are disposed above a forced aeration system, requiring no manual turning and accelerating the aerobic decomposition process. The objective of this work was to develop a composting prototype with forced aeration at laboratory scale, aiming for enable the execution of future scientific assays concerning this method of composting. For this purpose, the montage of a prototype was performed with two 200 L plastic barrels connected to air blowers, followed by definition of operational criteria and performance of a composting cycle with determination of parameters of organic matter, to evaluate the feasibility of this methodology to reproduce general conditions of the composting process. The composted material showed microbiological activity during the aeration period, with temperatures varying within the mesophilic range. Despite of having optimal moisture and C/N ratio initially, these parameters did not maintain ideal values until the end of the process. The prototype showed potential to simulate the composting process with forced aeration at small scale, requiring, however, improvements at some aspects.

Key-words: Composting. Forced air. Aerated static pile. Laboratory scale composting. Municipal Solid Waste. Organic waste management.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	7
1.2	OBJETIVOS.....	9
1.2.1	OBJETIVO GERAL.....	9
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
2	MÉTODOS	10
2.1	ETAPA PRELIMINAR.....	10
2.2	MONTAGEM E FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO DE COMPOSTAGEM POR AERAÇÃO FORÇADA EM ESCALA PILOTO.....	12
2.2.1	MONTAGEM DO PROTÓTIPO.....	12
2.2.2	MATÉRIA-PRIMA PARA A COMPOSTAGEM.....	14
2.2.3	AERAÇÃO.....	16
2.3	DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS.....	17
2.3.1	PARÂMETROS DO MATERIAL INICIAL E DO COMPOSTO FINAL.....	18
2.3.2	PARÂMETROS DE MONITORAMENTO.....	18
2.3.2.1	<i>Temperatura</i>	18
2.3.2.2	<i>Umidade</i>	19
2.3.2.3	<i>pH</i>	20
2.3.2.4	<i>Aspectos gerais</i>	21
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.1	ETAPA PRELIMINAR.....	22
3.2	MATERIAL INICIAL.....	24
3.3	MONITORAMENTO DO PROCESSO.....	25
3.3.1	TEMPERATURA.....	25
3.3.2	UMIDADE.....	26
3.3.3	PH.....	28
3.3.4	ASPECTOS GERAIS.....	29
3.4	COMPOSTO.....	30
3.5	CONSIDERAÇÕES, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS.....	31
4	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Estima-se que, no Brasil, cerca de 50% dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) consistam em resíduos orgânicos (BRASIL, 2012). Cerca de 95% dos RSU são destinados a aterros sanitários, a aterros controlados ou, na pior das situações, a lixões (BRASIL, 2018). Nestes locais, são depositados de forma permanente, gerando emissões de gases como o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂), os quais são causadores do efeito estufa, além do lixiviado ou chorume (fração líquida resultante da decomposição do resíduo orgânico, misturado a contaminantes inorgânicos, com propriedades altamente nocivas ao ambiente e a animais), o qual é um potencial poluidor do lençol freático e de corpos d'água em geral, quando não manejado adequadamente. Além do potencial impacto ambiental, a destinação da fração orgânica dos RSU gera altos custos à sociedade e à administração pública com o transporte dos centros urbanos até os locais de disposição final, os quais tendem a se situarem cada vez mais distantes dos centros urbanos, devido ao esgotamento das áreas passíveis de receberem aterro. Conforme dados de 2016, menos de 5% dos RSU com destinação registrada naquele ano no país sofreram processos capazes de reincorporá-los à cadeia produtiva, ao serem destinados a unidades de triagem e de compostagem; desta fração, apenas uma ínfima parte (menos de 1%) corresponde aos resíduos destinados exclusivamente a unidades de compostagem (BRASIL, 2018).

A compostagem consiste num processo de decomposição da matéria orgânica em condições relativamente controladas, a qual é mediada, geralmente, por microrganismos de metabolismo aeróbico já residentes na própria matéria a ser decomposta (RYNK *et al.*, 1992). A transformação da matéria orgânica pela compostagem pode resultar em dois subprodutos: um material sólido, particulado e de coloração escura, denominado genericamente de composto, e um material líquido, de coloração escura e odor forte, o lixiviado, podendo ambos serem utilizados como adubo para o cultivo agrícola, se manejados adequadamente. Diferentes métodos de compostagem já foram desenvolvidos, com variação no grau de mecanização e de automação do processo e, conseqüentemente, na eficiência deste. O método de compostagem por leiras estáticas aeradas (ou compostagem com aeração forçada) consiste em se dispor o material a ser decomposto em pilhas, leiras, ou em formato de paralelepípedo (quando disposto em baias, sendo sustentado lateralmente por paredes), sob as quais há um

sistema de tubulação perfurada, o qual é conectado a um dispositivo de bombeamento de ar, de forma que a pilha possa receber injeções de ar periodicamente, disponibilizando assim o oxigênio (O₂) necessário para a degradação da matéria orgânica pelos microrganismos. (RYNK *et al.*, 1992). Dessa forma, uma possível alternativa à destinação da fração orgânica dos RSU é a compostagem por leiras estáticas aeradas, uma vez que este método possibilita a decomposição de um grande volume de material em um período relativamente curto, gerando também produtos com valor comercial e tornando o processo de gestão dos RSU mais sustentável.

No Brasil, há ainda escassez de publicações com parâmetros técnicos de referência para a aplicação desse método de compostagem para a gestão dos RSU orgânicos. Além disso, estudos científicos em sistemas de compostagem de grande escala (por exemplo, escala industrial ou em centros de processamento de resíduo municipal) tendem a ser caros, difíceis de se controlar e dispendiosos em esforço de trabalho, de forma que o desenvolvimento de sistemas de compostagem em menor escala podem ser importantes ferramentas para a realização de pesquisa científica sobre compostagem (PHILLIP, 2010; PETIOT & DE GUARDIA, 2004).

Assim, este trabalho visa a contribuir para o desenvolvimento de um protótipo de compostagem com aeração forçada em pequena escala (laboratorial, ou “escala-piloto”, em tradução do termo inglês *pilot-scale*), aplicada a material proveniente de RSU, de forma a possibilitar a realização de ensaios futuros para a obtenção de mais parâmetros que possam contribuir para a execução e o aprimoramento deste método de compostagem em maior escala. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica (não sistemática) sobre este método de compostagem, seguida pela montagem de um protótipo em bombonas de 200 L, definição de parâmetros para a operação e execução do processo em escala laboratorial e mensuração de parâmetros físico-químicos no material em compostagem, de forma a avaliar a viabilidade do protótipo desenvolvido em simular as condições de um sistema de compostagem com aeração forçada em escala maior. O processo de operação do protótipo foi realizado no Laboratório de Estudos Ambientais para Metalurgia (LEAMet) do Centro de Tecnologia da UFRGS, localizado no Campus do Vale, em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um protótipo para compostagem com aeração forçada em escala laboratorial, avaliando a sua efetividade em reproduzir as condições gerais do processo de compostagem e visando à sua aplicação futura em ensaios científicos.

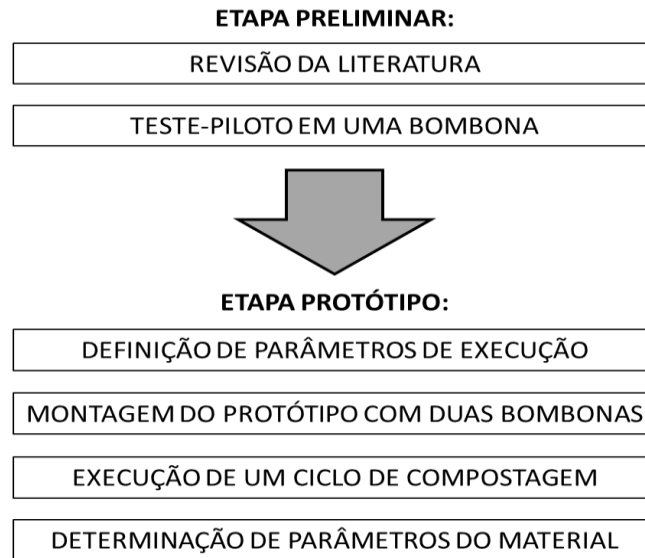
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar e montar um protótipo de sistema de compostagem em escala piloto para a execução de ensaios de compostagem com aeração forçada;
- Avaliar parâmetros físico-químicos no material inicial, durante o processo de decomposição (parâmetros de monitoramento) e no composto final;
- Estabelecer parâmetros mínimos que viabilizem a execução do processo de compostagem por aeração forçada em escala piloto, comparando-os com parâmetros descritos na literatura técnico-científica;
- Comparar diferenças durante o processo e no composto resultante quando há maior ou menor densidade de saídas de ar sob o material em decomposição.

2 MÉTODOS

A Figura 1 apresenta as etapas do trabalho de forma esquemática.

Figura 1 – Organização esquemática do trabalho.



Fonte: O autor (2019).

2.1 ETAPA PRELIMINAR

A etapa preliminar consistiu numa breve revisão bibliográfica juntamente com a execução de um ciclo de compostagem em bombona (teste-piloto). A fim de fundamentar teoricamente o planejamento e a execução da metodologia, foram realizadas pesquisas na bibliografia na forma de revisão narrativa (não sistemática) - conforme definição de Bernardo *et al.* (2004). Foram consultados trabalhos publicados em livros, artigos de periódicos, teses, dissertações, monografias, bem como normas e conteúdo de legislação relacionada ao tema. Como fontes para a obtenção da bibliografia, foi utilizado material já disponibilizado e conhecido pela equipe do laboratório, bem como material obtido a partir de pesquisas em bases de dados *on-line* nacionais e internacionais, como o Google Acadêmico, o Portal de Periódicos da CAPES, a SciELO, a ScienceDirect, dentre outras. As palavras-chave utilizadas nas buscas foram: compostagem aeração forçada; compostagem leiras estáticas aeradas; compostagem resíduos sólidos; *aerated static pile composting*; *composting pilot scale*; *composting pH monitoring*; dentre outras.

Com a finalidade de se obter conhecimento empírico sobre o processo de compostagem com aeração forçada em bombona, foi realizado um ciclo de

compostagem em uma bombona por cerca de dois meses (2 de maio a 17 de julho de 2019). A execução deste ciclo foi realizada sem embasamento rigoroso na literatura técnico-científica, sendo definidas as condições do experimento baseando-se somente na experiência prévia da equipe do LEAMet, de forma que isso gerasse observações que contribuiriam para a execução mais bem fundamentada e planejada posteriormente.

Dessa forma, o protótipo foi montado inicialmente em uma bombona de polietileno de 200 L, disposta verticalmente, na qual foi acoplado um sistema de aeração com tubo de PVC (policloreto de vinila) conectado a um compressor de ar (marca PEG, modelo BPIS 5,2, potência de 1 *hp*). O cano de PVC, com 60 mm de diâmetro, foi inserido na região inferior da bombona, sendo feitos três furos, para a injeção do ar, na sua face superior com 6 mm de diâmetro cada e espaçados entre si por cerca de 10 mm, posicionados centralmente na base da bombona. Sobre o cano, foi confeccionada uma base com superfície emborrachada e com abertura na região das saídas de ar. A fim de se evitar o entupimento das saídas de ar, estas foram cobertas por uma tela metálica, sobre a qual o material orgânico foi diretamente disposto. Para a coleta de lixiviado, houve inserção de uma torneira lateral na extremidade inferior da bombona, sendo disposta abaixo da torneira uma garrafa de 5 L como reservatório. Inicialmente, a bombona foi coberta apenas com a própria tampa, a qual deixava frestas (não vedava completamente); assim, após alguns dias de operação, foi adicionada uma rede de *nylon* de malha fina abaixo da tampa, de forma a se evitar insetos no material. A bombona estava situada embaixo de uma estrutura com telhado, de forma que não recebia água em dias de chuva.

O material compostado consistia principalmente em restos de alimento pré-preparo – ou seja, não cozido (resíduo proveniente do restaurante Beta Bistrô, situado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH da UFRGS), sendo dispostas também uma camada de folhas e galhos finos (resíduo de poda) na base da bombona e, após disposto todo o material de restos de alimento, uma camada superior de resíduo de corte de capim. O resíduo de alimento foi adicionado em três cargas semanais (em semanas consecutivas desde o primeiro dia), totalizando cerca de 115 L deste material (os outros materiais adicionados às camadas basal e superior não tiveram volume estimado).

A ativação do compressor para a aeração do material foi realizada de forma manual com um disjuntor, ocorrendo em três períodos por dia durante cerca de 30 min., de segunda a sexta-feira (um período pela manhã – próximo das 7:00, um período próximo ao meio-dia e outro período ao final da tarde – próximo das 18:00). A partir do último mês (julho), aumentou-se a duração dos períodos de aeração para 1 hora.

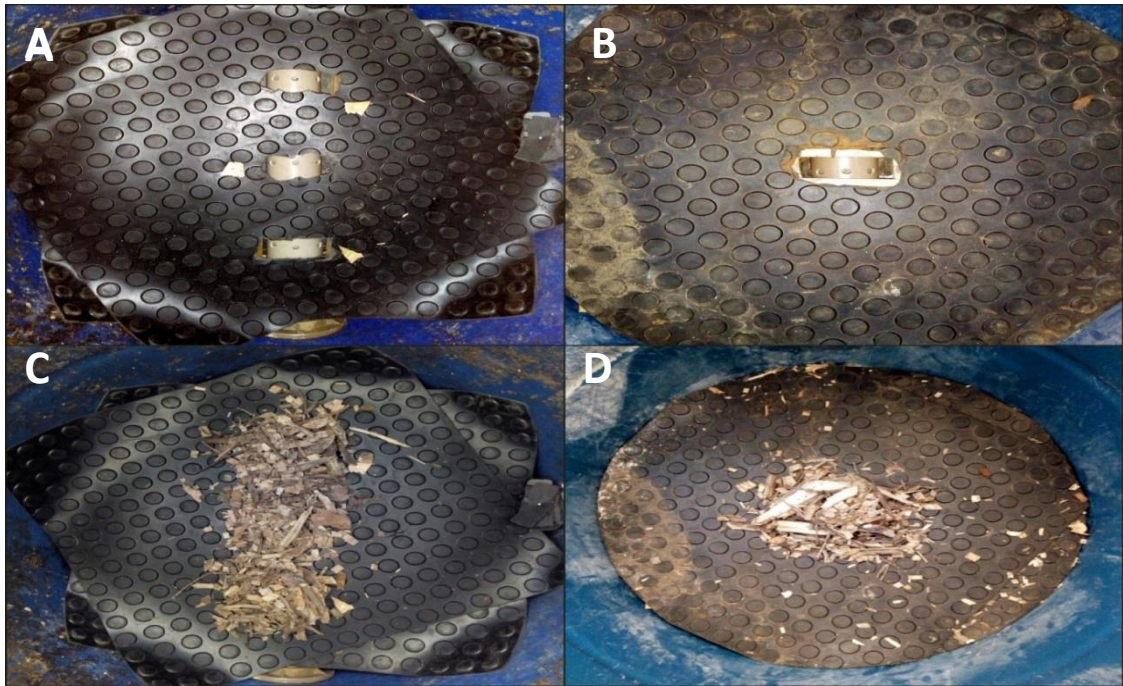
2.2 MONTAGEM E FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO DE COMPOSTAGEM POR AERAÇÃO FORÇADA EM ESCALA PILOTO

A partir da experiência obtida com a execução de um ciclo de compostagem no teste-prelípiloto, juntamente com a consulta e análise da literatura sobre o tema, foram redefinidos critérios para a execução aprimorada da metodologia. A compostagem de resíduos nesta etapa se deu em duas bombonas, sendo iniciado o ciclo de compostagem em ambas no dia 1 de outubro de 2019. Os critérios para a execução do processo foram definidos de forma idêntica para as duas bombonas, exceto pela aeração do material orgânico, de forma que uma bombona possuía 9 saídas de ar, enquanto a outra possuía 3 saídas de ar.

2.2.1 MONTAGEM DO PROTÓTIPO

Cada bombona de polietileno possuía 200 L de volume total e cerca de 170 L de capacidade volumétrica útil (valores aproximados calculados para um cilindro com 66 cm de altura e 58 cm de diâmetro), recebendo tubulação acoplada de cano PVC (60 mm de diâmetro) para a aeração com inserção numa altura de aproximadamente 5 cm desde a base. Cada furo para a saída de ar possuía 8 mm de diâmetro, sendo dispostos sempre em conjuntos de três furos (de forma que, no eixo transversal ao comprimento do cano, ficassem a -45° , 0° e $+45^\circ$, sendo o furo da posição 0° disposto central e superiormente). A bombona B9 possuía 9 furos para a saída de ar (Fig. 2A), os quais foram dispostos em conjuntos de 3 furos ao longo do eixo do comprimento do cano com espaçamento igual entre si e com as paredes da bombona. A bombona B3 possuía somente três furos para a saída de ar (Fig. 2B), sendo o conjunto de furos disposto centralmente na bombona. Acima do cano perfurado, foi disposta uma base emborrachada (com aberturas nas regiões de saídas de ar) para sustentar o material a ser aerado. Antes de se adicionar o material orgânico, cada conjunto de saídas de ar de cada bombona foi coberto com uma “cama” de cavacos de madeira (aproximadamente 5 cm de altura), a fim de promover uma melhor distribuição do ar injetado sobre o material e para evitar entupimento das saídas (conforme recomendado por Rynk *et al.*, 1992; Fig. 2C e 2D).

Figura 2 – Saídas de ar das bombonas.



A e C – Interior da bombona B9 com saídas de ar antes (A) e após (C) a cobertura com cavacos de madeira (vista superior). **B e D** – Interior da bombona B3 com saídas de ar antes (B) e após (D) a cobertura com cavacos de madeira (vista superior). Fonte: O autor (2019).

Como motor para a aeração, foram utilizados dois sopradores (marca STANLEY, modelo STPT600-B2, potência de 0,8 *hp*, vazão de até 3,5 m³/min.), sendo conectado um a cada bombona (Fig. 3A). Após 1 mês de operação, devido a problemas com os sopradores (queima devido a descarga elétrica), não foi possível continuar a aeração do material.

Para se evitar a passagem de insetos para o material em compostagem, as bombonas foram mantidas cobertas por uma rede de *nylon* de malha fina. Foram instaladas torneiras embaixo de cada bombona para a drenagem e coleta de lixiviado, sendo que para isso as bombonas foram dispostas sobre *pallets* de madeira para elevação do piso a uma altura suficiente para possibilitar a drenagem do lixiviado por mangueiras conectadas às torneiras.

A Figura 3B mostra o aspecto geral da área do protótipo com as duas bombonas. Estas foram dispostas embaixo de um telhado, de forma que em dias de chuva o material em decomposição não recebia água.

Figura 3 – Protótipo de compostagem com aeração forçada.



A – Protótipo de compostagem com duas bombonas. **B** - Vista geral da área do protótipo. Fonte: O autor (2019).

2.2.2 MATÉRIA-PRIMA PARA A COMPOSTAGEM

Utilizou-se três fontes de material orgânico para a mistura em compostagem: restos de alimento de restaurantes (resíduo do restaurante Beta Bistrô do IPH - UFRGS e resíduo do Restaurante Universitário 6 do Campus do Vale da UFRGS), sendo desta vez tanto alimento pré-cozimento quanto pós-cozimento de ambas as fontes, e cavacos de madeira provenientes de resíduo de poda triturado da Faculdade de Agronomia da UFRGS (Fig. 4A e 4B). Os resíduos de alimento provenientes dos dois restaurantes foram misturados.

Conforme descrito por diferentes autores, os nutrientes primários requeridos pelos microrganismos responsáveis pela compostagem são Carbono (C), Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K); entretanto, na grande maioria das vezes, somente C e N costumam ser limitantes para o processo de decomposição, uma vez que estes são responsáveis pela produção de energia, crescimento, síntese proteica e reprodução dos organismos, sendo que os outros nutrientes costumam estar presentes em quantidade suficiente na maioria dos resíduos

utilizados como matéria-prima para a compostagem (RYNK *et al.*, 1992; PEREIRA NETO, 2007; GRAVES *et al.*, 2010). Além disso, conforme consensuado por estes e outros autores, a proporção entre o conteúdo desses dois elementos é um fator importante para a eficiência do processo, devendo-se idealmente manter uma relação C/N inicial entre 30 e 40. Dessa forma, para o cálculo da proporção de cada fonte de material a ser misturada, utilizou-se as equações 1 e 2, descritas por Graves *et al.* (2010), as quais se baseiam apenas no parâmetro da relação C/N de cada fonte de material orgânico, conforme descrito:

$$X_{Ca} + Y_{Cb} = C \quad (1)$$

$$X_{Na} + Y_{Nb} = N \quad (2)$$

Onde:

X_C = conteúdo de carbono do material X
 a = proporção do material X na mistura
 Y_C = conteúdo de carbono do material Y
 b = proporção do material Y na mistura
 C = conteúdo de carbono na mistura
 X_N = conteúdo de nitrogênio do material X
 Y_N = conteúdo de nitrogênio do material Y
 N = conteúdo de nitrogênio na mistura

Assim, a relação C/N a ser obtida na mistura de material foi definida como de 35 : 1. Uma vez que não se tinha ainda os valores reais de conteúdo desses nutrientes de cada fonte de material, para o cálculo foram utilizados valores médios (tabelados) descritos para cada fonte, conforme apresentado por Graves *et al.* (2010) e por Rynk *et al.* (1992). A partir dos resultados obtidos pela fórmula, os materiais foram misturados de forma que a proporção na mistura fosse (em massa/massa) de 51,44% de restos de alimento e 48,55% de cavacos de madeira. Cada tipo de material teve sua massa determinada na proporção descrita com a utilização de uma balança (marca Toledo, modelo 2098/23), sendo misturados sobre uma lona com o auxílio de uma pá (Fig. 4C) e então adicionados em quantidades volumetricamente iguais a cada bombona com a utilização de um balde graduado (Fig. 4D). Este procedimento ocorreu em dois dias diferentes (duas cargas): no dia 1 de outubro de 2019 (primeiro dia de operação do protótipo) e no dia 8 de outubro de 2019. Além da mistura de restos de alimento com cavacos de madeira, foi adicionada (em 04/10/19) uma camada intermediária (entre as duas cargas da mistura) de composto parcialmente maturado (com aproximadamente dois meses de compostagem) proveniente da Unidade de Triagem e Compostagem Francisco Engel Rodrigues, do Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU), situada no bairro Lomba do Pinheiro (Porto Alegre/RS), servindo como inóculo para o processo de

compostagem no protótipo, o qual foi adicionado na quantidade de 15,2 L a cada bombona. Dessa forma, cada bombona recebeu cerca de 114 L da mistura de restos de alimento com cavaco de madeira e cerca de 15,2 L de composto parcialmente maturado, totalizando aproximadamente 129,2 L de material por bombona, sendo isso equivalente a uma altura inicial aproximada de 46 cm de material.

Figura 4 – Mistura inicial de materiais para a compostagem.



A – Pesagem de cavacos de madeira. **B** – Disposição da matéria-prima na proporção definida, antes da homogeneização. **C** – Cavacos de madeira e restos de alimento homogeneizados. **D** – Balde graduado volumetricamente contendo a mistura a ser distribuída nas bombonas. O mesmo procedimento foi realizado em dois dias diferentes (duas cargas). Fonte: O autor (2019).

2.2.3 AERAÇÃO

Conforme diferentes autores (BEFFA, 2002; HAUG, 1986 *apud* GRAVES *et al.*, 2010), a aeração do material pode atender três demandas: a necessidade metabólica de O₂ dos microrganismos, a redução no teor de umidade do material e a redução na temperatura do material (por perda de calor), sendo que a quantidade de ar requerida para se atingir a demanda microbiológica é significativamente menor do que a quantidade requerida para as outras demandas. Segundo Graves *et al.* (2010), para a manutenção da atividade microbiológica aeróbica, os níveis de O₂ devem se manter iguais ou acima de 5%. Beffa (2002) relata que, em compostos não maturados (1-4 semanas) na fase termogênica (temperatura em 60-75 °C), o O₂ introduzido no material por diferentes métodos de aeração foi esgotado em menos de 1 h. Assim, visando à manutenção do O₂ no material em níveis

ótimos para a atividade microbiológica, foi priorizada a aeração do material em períodos mais frequentes e de menor duração.

Diferentemente da etapa preliminar, nesta etapa foi utilizado um temporizador (marca ALTRONIC, modelo PDST 01) para o controle automatizado da aeração do material. Este foi conectado à rede elétrica para o fornecimento de energia aos sopradores, sendo então programados os períodos de aeração do material nas bombonas. Considerando a limitação de programação do temporizador utilizado, foram definidos períodos diários de aeração da seguinte forma: 20 min. de aeração (sopradores ativados), seguidos por 1 h e 10 min. sem aeração (sopradores desligados), ocorrendo dessa forma em sequência por 16 vezes ao longo das 24 h de cada dia. Durante todo o tempo de aeração por sopradores, estes foram mantidos na velocidade 5 de potência (cada soprador possuía 7 velocidades no total).

2.3 DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS

O Quadro 1 apresenta a relação dos parâmetros avaliados no material orgânico em cada momento e os respectivos métodos de determinação. A amostragem dos materiais foi baseada na NBR 10007/2004 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004), que estabelece padrões para a amostragem de resíduos sólidos.

Quadro 1 – Relação entre parâmetros avaliados, momento da avaliação e método empregado				
PARÂMETRO	NO MATERIAL INICIAL	DURANTE O PROCESSO	NO COMPOSTO FINAL	MÉTODO DE DETERMINAÇÃO
Temperatura (°C)	-	X	-	Medição com sensor
Umidade ¹ – % (m/m)	X	X	-	Gravimetria ² e Medição com sensor
pH	X	X	-	Potenciometria ²
Densidade – kg/m ³	X	-	-	-
Carbono orgânico – % (m/m)	X	-	X	Combustão úmida/ Walkley-Black ³
Nitrogênio (TKN) – % (m/m)	X	-	X	Kjeldahl ⁴
1 – A umidade medida por gravimetria refere-se ao teor de água perdida por massa úmida de material quando secado em estufa a 65 °C por 24 h; o teor de umidade obtido por sensor refere-se à <i>umidade do ar</i> no interior do material em compostagem. 2 – Baseado em Abreu <i>et al.</i> (2006). 3 – Walkley & Black (1934). 4 - Bremner & Mulvaney (1984). X = sim. Fonte: O autor (2019).				

2.3.1 PARÂMETROS DO MATERIAL INICIAL E DO COMPOSTO FINAL

A determinação de parâmetros físico-químicos dos materiais iniciais e do composto ocorreu mediante o envio de amostras para análise no Laboratório de Análises (LAS) do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS. O composto resultante do processo foi peneirado (malha de 6,3 mm) e submetido para análise após cerca de 2 meses do início da operação do protótipo (sendo, portanto, submetido a 1 mês de aeração).

2.3.2 PARÂMETROS DE MONITORAMENTO

O monitoramento do processo de compostagem nas bombonas se deu a partir da determinação periódica dos parâmetros temperatura, umidade e pH. A determinação da massa das amostras dos materiais durante as análises foi realizada com a utilização de balança de precisão semi-analítica (marca Shimadzu, modelo BL320H).

Devido à indisponibilidade de alguns equipamentos até determinado momento (eletrodo de pHmetro, termômetro para estufa), somente a partir da 3ª semana de operação foi possível a realização das análises de umidade a 65 °C e de pH no próprio LEAMet. Já os registros da temperatura e umidade do ar no interior do material das bombonas foram realizados a partir do final da segunda semana de operação (a partir de quando se obtiveram os termo-higrômetros, os quais tiveram que ser adaptados e testados previamente ao uso, conforme descrito a seguir).

Além disso, eventualmente foram registradas observações acerca do aspecto do material e do protótipo em geral. Em diferentes momentos, dependendo do teor de umidade obtido pela análise e do aspecto do composto observado durante a amostragem de material em cada bombona, foi realizada a adição de água (com o objetivo de aumentar o teor de umidade no material) nas seguintes quantidades: B9 – 250 mL em 18/10, 500 mL em 23/10, 500 mL em 24/10, 500 mL em 25/10, 1 L em 01/11; B3 – 250 mL em 24/10, 250 mL em 25/10; 1 L em 01/11.

2.3.2.1 *Temperatura*

A determinação da temperatura do material, bem como da temperatura ambiente, foi realizada com a utilização de termo-higrômetros, sendo utilizado um para

cada bombona. Cada termo-higrômetro (marca Incoterm, modelo 7664) possuía um cabo com um sensor na ponta (externo) e um sensor interno na região do visor do aparelho (sendo este para registro da temperatura ambiente). O sensor externo de cada aparelho foi adaptado com uma proteção de plástico ao redor, de forma que este não entrasse em contato direto com o material (uma vez que isto poderia danificar o sensor). Esta proteção foi perfurada de forma a permitir o contato do ar no interior do material com o sensor dentro da proteção. Previamente à inserção dos sensores em cada bombona, estes passaram por um período de testes de forma a assegurar a confiabilidade das medições com a proteção de plástico. Assim, em seguida, cada sensor foi inserido no interior do material de cada bombona, sendo disposto em posição central e aproximadamente na metade da altura da coluna de material (cerca de 20 cm de profundidade).

Os sensores foram posicionados no material no dia 11 de outubro de 2019, sendo a partir de então mantidos fixos ali e realizados, após a estabilização por algumas horas, os registros de temperatura referentes aos dias subsequentes. Os registros foram realizados uma vez por dia de segunda à sexta-feira (sempre próximo das 17h30min.), sendo que em finais de semana foi considerado como registro o valor da média entre as máximas e mínimas registradas (dados disponíveis no aparelho) por cada sensor entre o final do dia de cada sexta-feira e o início do dia de cada segunda-feira.

2.3.2.2 *Umidade*

A umidade foi aferida de duas formas distintas: diariamente, mediante registro dos valores de *umidade do ar* no interior do volume de material em cada bombona, obtido via sensoramento pelos termo-higrômetros; semanalmente, mediante amostragem e secagem em estufa a 65 °C do material das bombonas, conforme método descrito a seguir. O registro da umidade a 65 °C do material na 1ª semana de operação foi obtido a partir da análise feita no LAS. Conforme já descrito, a mensuração de parâmetros via termo-higrômetro foi iniciada nos dias 12 e 13 de outubro (final da 2ª semana), após a inserção dos sensores no material de cada bombona, sendo o registro da umidade obtida por este método realizado na mesma frequência e momento dos registros da temperatura do material.

O material de cada bombona teve o teor de umidade determinado pela realização de ensaios para a avaliação da umidade a 65 °C baseando-se em

metodologias descritas por diferentes autores (ABREU *et al.*, 2006; BRASIL, 2014). A metodologia consistia em pesar cerca de 10 g de uma amostra composta (previamente homogeneizada a partir da coleta em diferentes pontos do material) de cada bombona em um vidro de relógio, o qual era em seguida disposto em uma estufa (marca DeLeo) para a secagem, sendo esta previamente aquecida a 65 °C e mantida em temperatura constante. Após pelo menos 24 h (tempo suficiente para se obter a constância da massa do material), cada vidro de relógio contendo o material seco era pesado novamente para a determinação da massa, sendo então calculado o teor de umidade por base úmida de acordo com a equação 3 (ABREU *et al.*, 2006):

$$U_{65} = 100 \frac{(m_{\text{úmida}} - m_{65})}{m_{\text{úmida}}} \quad (3)$$

Onde:

$m_{\text{úmida}}$ = massa inicial do material sólido
 m_{65} = massa do material sólido secado a 65 °C
 U_{65} = umidade do material sólido a 65 °C

A determinação da umidade por este método ocorreu a partir da terceira semana de operação.

2.3.2.3 pH

O pH do material em compostagem foi determinado baseando-se em metodologias previamente descritas (USA, 1995; ABREU *et al.*, 2006; BRASIL, 2014). Seguindo o método EPA-9045C (USA, 1995), o pH das amostras compostas de cada bombona foi determinado em solução aquosa. A diluição das amostras se deu na proporção de 1 : 2, sendo uma parte de amostra do material (massa) para duas partes de água destilada. Assim, para cada bombona, 20 g da amostra composta eram diluídos em 40 mL de água destilada. A solução, disposta em um béquer coberto por um plástico, era então homogeneizada com o uso de um agitador magnético (marca Marconi, modelo TE085) por pelo menos 5 min., sendo em seguida mantida em repouso por pelo menos 15 min. Após isso, a solução tinha sua fase líquida transferida para outro béquer, de menor volume, no qual era realizada a leitura do pH pela inserção do eletrodo do pHmetro na solução (marca Analion, modelo PM 608). A avaliação do pH foi realizada semanalmente.

2.3.2.4 Aspectos gerais

Além da determinação de parâmetros físico-químicos, foram realizadas observações sobre o aspecto geral do protótipo e do material em compostagem (por exemplo, percepção de odor, aspecto físico do material). Eventualmente também foram realizados registros fotográficos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ETAPA PRELIMINAR

A realização do ciclo de compostagem em bombona durante a etapa preliminar (teste-piloto) falhou, pois resultou num composto de aspecto insatisfatório. Porém, somada à consulta à bibliografia, foi de importância crucial para o aprimoramento da metodologia na etapa subsequente.

Já nas primeiras semanas, devido à exposição dos resíduos de alimento ao contato externo durante a primeira semana de operação, houve alta proliferação de insetos (principalmente moscas). A partir do mesmo período (2 a 3 semanas de operação), também se constatou a intensificação do odor gerado, o qual tinha aspecto fétido e era perceptível ao se aproximar da bombona. Ao longo de todo o processo, foram coletados pelo menos cerca de 4 L de lixiviado (possivelmente foi gerada maior quantidade, a qual deve ter sofrido evaporação antes da coleta, ou não teve o volume registrado após coletada). No dia 17 de julho, após cerca de 2,5 meses de operação do processo com aeração mecanizada, foi realizado o reviramento manual do material na bombona, sendo possível observar o aspecto em que este se encontrava. Conforme a Figura 5, o material, na região contendo restos de alimento, apresentou-se bastante denso e compactado (aspecto pastoso), com forte odor e com partes de vegetais identificáveis (não degradados). Diferentes autores (BEFFA, 2002; PEREIRA NETO, 2007; dentre outros) descrevem que a anaerobiose na compostagem leva à produção de odores ruins, devido à produção de metabólitos como ácidos propiônico e butírico, compostos sulfurados e amônia. Assim, provavelmente estava ocorrendo um processo de degradação anaeróbica. Dessa forma, hipotetizou-se que, pelo menos, dois fatores teriam levado à falha na decomposição adequada do resíduo: a composição do material em degradação (majoritariamente restos de alimento), de forma que a estruturação e o teor de umidade estavam inadequados para a compostagem, e a aeração insuficiente desse material (fatores estes relacionados entre si, conforme discutido a seguir).

Rynk *et al.*(1992), Fricke & Santen (2005) e Graves *et al.* (2010) citam a importância do uso de um agente estruturante de volume (resistente mecanicamente e à degradação) em meio à massa de material em compostagem, de forma a garantir a estruturação e porosidade adequadas, por consequência permitindo o fornecimento adequado de O₂ aos microrganismos no material.

Figura 5 – Material parcialmente decomposto na etapa preliminar.



A – Camada de capim sendo retirada com pá. **B** – Interior da massa de material, apresentando aspecto pastoso e com resíduos parcialmente decompostos. Fonte: O autor (2019).

Diferentes autores descrevem a homogeneização prévia dos materiais a serem compostados como uma das etapas básicas do processo de compostagem (BEFFA, 2002; RYNK *et al.*, 1992). Além disso, a homogeneização do material pode prevenir a formação de zonas de anaerobiose no interior do material (FRICKE & SANTEN, 2005). Assim, a disposição dos restos de alimento diretamente nas bombonas e sem a homogeneização prévia com outros materiais (os quais estavam presentes em menor quantidade em outras camadas, mas não misturados, como as folhas e o resíduo de capim) deve ter provocado a sua compactação - considerando que se tratava de uma matéria-prima com alto teor de umidade e baixa resistência mecânica - possivelmente sendo um dos principais fatores que levaram a uma aeração insuficiente desse material, uma vez que o O_2 não penetrava no interior da massa de material, não permitindo o desenvolvimento sucessional dos microrganismos aeróbicos. Além disso, é possível que a quantidade e a velocidade em que o ar era injetado no material (a qual é resultante da potência em que operava o compressor), o diâmetro (6 mm) e a quantidade (3) das saídas de ar, somados à distribuição inadequada do ar já no primeiro contato

com o material e à longa duração dos períodos sem aeração (aeração ocorria em somente 5 dias na semana, em 3 períodos diários de 30 min. a 1h), também tenham favorecido a anaerobiose no material, levando à falha no processo de compostagem nesta etapa.

3.2 MATERIAL INICIAL

A Tabela 1 apresenta os resultados da análise físico-química dos restos de alimento, dos cavacos de madeira e da mistura inicial. Os valores médios (tabelados) de conteúdo de C e N de cada matéria-prima utilizada divergiram dos valores reais. Assim, apesar de o cálculo para se determinar a proporção da quantidade de cada matéria-prima a ser misturada não ter sido baseado nos valores reais, a relação C/N resultante na mistura (38,1) não divergiu consideravelmente da relação C/N prevista pela fórmula (35).

Pereira Neto (2007) descreve que o teor de umidade do material em compostagem deve ser mantido, durante a maior parte do processo, idealmente, em torno de 55%, de forma que valores muito acima deste (acima de 60%) tendem a provocar anaerobiose, devido à redução na porosidade do material, enquanto valores muito abaixo deste (menores que 40%) tendem a restringir a atividade microbológica. Dessa forma, tanto a relação C/N quanto a umidade iniciais do material, considerados fatores de alta relevância para o início adequado do processo, estavam dentro da faixa ótima para a compostagem.

Tabela 1 – Resultados da análise físico-química dos materiais iniciais			
PARÂMETRO	RESTOS DE ALIMENTO	CAVACOS DE MADEIRA	MISTURA INICIAL
Carbono orgânico – % (m/m)	48	39	42
Nitrogênio (TKN) – % (m/m)	4	0,48	1,1
Umidade – % (m/m)	-	-	53
pH	-	-	6,1
Densidade – kg/m ³	-	-	360

Obs. 2: Resultados expressos na amostra seca a 65 °C, com exceção do pH e densidade.

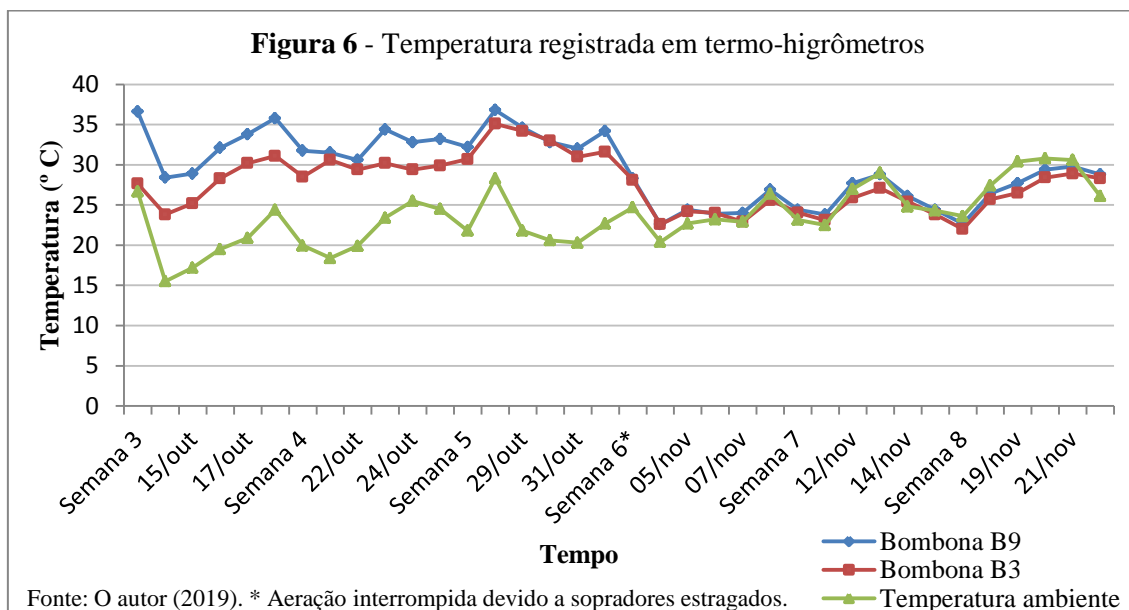
Obs. 3: Média de duas determinações.

Fonte: O autor (2019).

3.3 MONITORAMENTO DO PROCESSO

3.3.1 TEMPERATURA

As temperaturas registradas pelos termo-higrômetros diariamente são apresentadas na Figura 6.



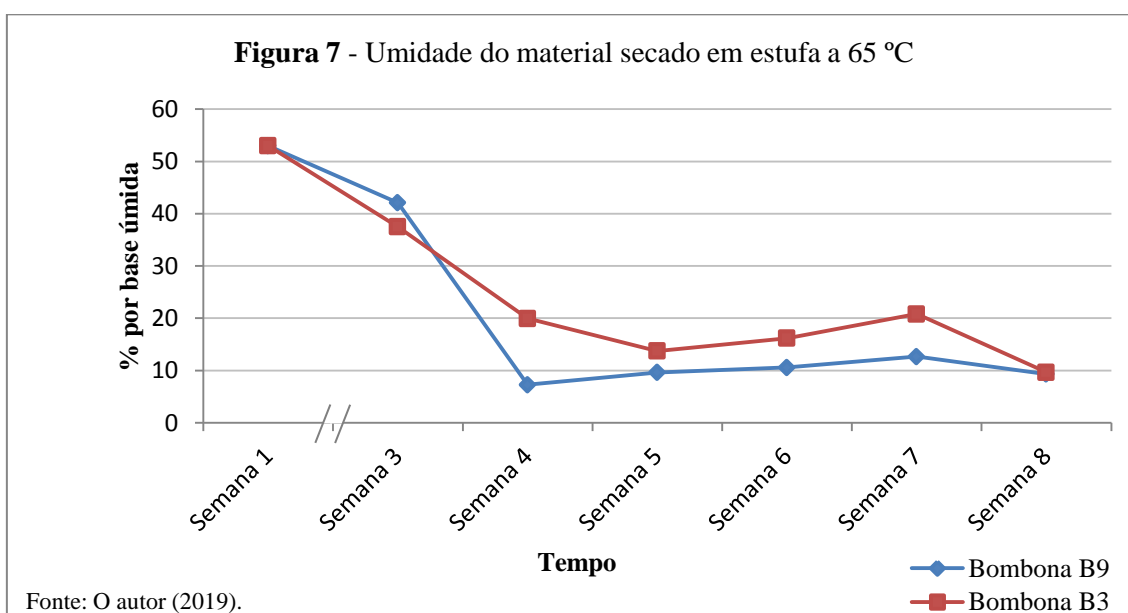
Conforme dados registrados nos termo-higrômetros (não dispostos na Figura 6) durante as semanas em que houve aeração (e registro da temperatura), o material da bombona B9 atingiu temperaturas máximas de 44,8 °C, 35,8 °C e 39 °C nas semanas 3, 4 e 5, respectivamente; no mesmo período, o material da bombona B3 atingiu temperaturas máximas de 32 °C, 32,2 °C e 36,6 °C (semanas 3, 4 e 5, respectivamente). Schiraldi & De Rosa (2014) definem microrganismos mesofílicos como sendo organismos com capacidade de crescerem numa faixa de temperatura de 20-45 °C, possuindo atividade ótima de crescimento a 30-39 °C. Assim, a temperatura registrada nas bombonas pelos termo-higrômetros manteve-se dentro da faixa mesofílica durante o período registrado, não atingindo valores tipicamente termofílicos (acima de 45 °C). Conforme a Figura 6, após a interrupção da aeração (semana 6), as temperaturas nos materiais de ambas as bombonas, antes variando predominantemente em valores acima da temperatura ambiente, passaram a variar em valores praticamente idênticos aos

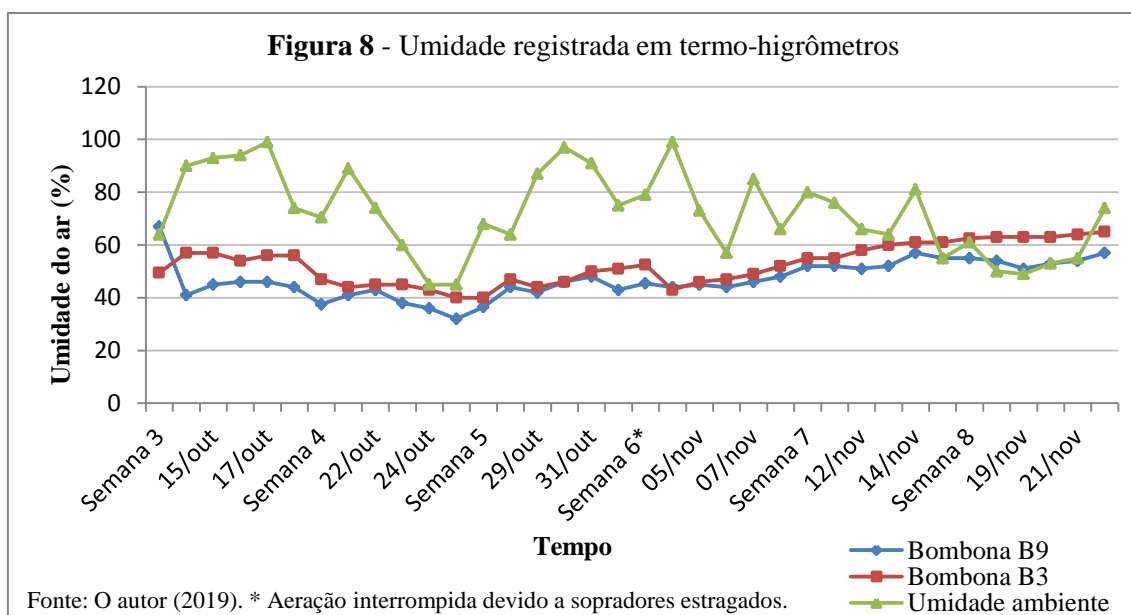
registrados externamente. Com isso, considerando que o aumento na temperatura do material em compostagem é um reflexo do acúmulo de calor produzido durante o processo de decomposição, pode-se afirmar que, nas duas bombonas, havia atividade microbiológica aeróbica predominantemente mesofílica durante o período de aeração.

Dinçer *et al.* (2003), num estudo de compostagem em condições relativamente semelhantes às do presente trabalho (volume de material de 140 L, reator cilíndrico fechado com dimensões semelhantes, aeração mecanizada por 1,5 min. a cada 1 h), registraram temperaturas acima de 50 °C durante alguns dias nos primeiros 10 dias de compostagem, sendo que após 12 dias a temperatura já havia declinado a valores abaixo de 45 °C. Assim, é possível que a temperatura do material deste experimento (nas duas bombonas) tenha atingido valores termofílicos durante as duas primeiras semanas de operação, nas quais não havia sido realizado ainda registro de temperatura, devido à indisponibilidade de equipamento para isso.

3.3.2 UMIDADE

A Figura 7 apresenta a variação no teor de umidade do material mensurado por secagem de amostras em estufa a 65 °C, enquanto a Figura 8 apresenta o teor de umidade do ar no interior do volume de material registrado pelos termo-higrômetros em cada bombona.





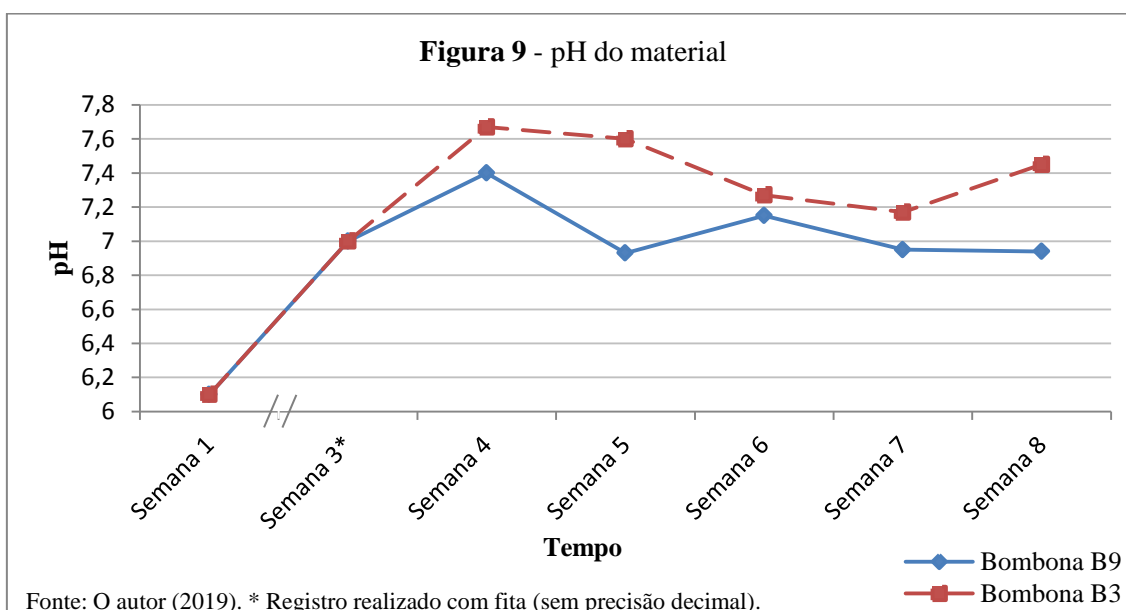
Inicialmente, conforme já descrito, a mistura de materiais adicionada às duas bombonas apresentava teor de umidade em torno de 53%, situando-se na faixa ideal para este parâmetro. Conforme observado na Figura 7, já na 3ª semana de operação houve um decréscimo no teor de umidade do material das duas bombonas. É possível que nesta semana tenha ocorrido uma variação de amostragem no resultado obtido para o teor de umidade a 65ª C em cada bombona, uma vez que observando (a) os valores de umidade do ar no interior de cada bombona e (b) o aspecto do material em cada bombona durante a amostragem nesta semana (realizada em 15/10), havia indícios de que a bombona B9 teria material com menor teor de umidade do que a bombona B3 (de forma oposta ao que foi obtido pela análise por secagem em estufa a 65 °C neste período). O declínio no teor de umidade foi intensificado nas semanas seguintes, ocorrendo de forma mais acentuada na bombona B9. Apesar de ter sido realizada a adição de água em alguns momentos (conforme descrito na seção 2.3.2), o teor de umidade continuou declinando, mantendo-se mais baixo no material da bombona B9 do que no da bombona B3, o que também é corroborado pelos resultados do teor de umidade do ar no interior das bombonas (Fig. 8). Assim, conforme a Figura 7, da semana 4 em diante, o teor de umidade do material de ambas as bombonas manteve-se consideravelmente abaixo do mínimo recomendado de 40% (PEREIRA NETO, 2007). Segundo Graves *et al.* (2010), no material com teor de umidade abaixo de 15%, há interrupção da atividade microbológica. Além disso, um desbalanceamento dos teores de umidade tende a ser mais crítico para o andamento do processo do que um

desbalanceamento na relação C/N. Apesar disso, os resultados do monitoramento de temperatura expressos na Figura 6 indicam que até a semana 6, enquanto havia aeração, ainda ocorria atividade microbiológica aeróbica.

Considerando que a composição inicial dos materiais, assim como a frequência e a intensidade de aeração eram as mesmas em cada bombona, é provável que o principal fator que provocou a diminuição no teor de umidade de forma mais acentuada na bombona B9 seja a maior quantidade de saídas de ar nesta bombona em comparação à bombona B3. Além disso, a redução do teor de umidade a valores críticos no material das duas bombonas pode se justificar por fatores como: a operação em um sistema aberto, em que há perda constante de água por evaporação sem que haja reposição pela chuva, neste caso, o que exige reposição manual da água para se manter a umidade em níveis ideais; a intensidade de aeração resultante da potência de operação dos sopradores, os quais podem ter sido operados em intensidade além da necessária para satisfazer a demanda microbiológica, intensificando as perdas por evaporação; a composição da mistura de material orgânico, com alta proporção de cavacos de madeira (material higroscópico).

3.3.3 pH

Os valores de pH registrados no material são apresentados na Figura 9.



Comparando as duas bombonas, o material da bombona B9 manteve ligeira acidez em relação ao material da bombona B3, na maior parte do tempo de monitoramento. O material de ambas as bombonas apresentou variação do pH em torno de 7, ocorrendo um aumento sutil em comparação ao pH da mistura inicial. Conforme Graves *et al.* (2010) e Pereira Neto (2007), a faixa ideal para a atividade microbiológica na compostagem situa-se entre 6,5 e 8, sendo que em níveis extremos (por exemplo, pH 5 e pH 9) o processo continua, mas é desacelerado. Rynk *et al.* (1992) descrevem que, independentemente do pH dos materiais iniciais, a compostagem gera um produto final com pH estável aproximadamente neutro. Assim, o pH do material de ambas as bombonas manteve-se dentro da faixa ideal recomendada.

3.3.4 ASPECTOS GERAIS

Em comparação à etapa preliminar, nesta etapa, o material em compostagem, tanto na bombona B9 quanto na bombona B3, não apresentou odor fétido em qualquer momento, sendo perceptível odor de aspecto “adocicado” e agradável durante a maior parte do tempo, enquanto houve aeração pelos sopradores. Isso serve como um indicativo de que, ao menos na maior parte do material, havia aeração e estruturação adequadas o suficiente para não ocorrer anaerobiose.

Quanto ao lixiviado, não foi registrada a drenagem de qualquer quantidade nas duas bombonas. Pereira Neto (2007) diz que durante a degradação aeróbica da matéria orgânica, a geração de lixiviado tende a ocorrer somente quando há excesso de umidade, sendo que a operação da compostagem na faixa de umidade de 45-65% não gera lixiviado. Assim, como o teor de umidade do material nas duas bombonas chegou ao valor máximo registrado de 53%, isso explica a ausência de líquido drenado.

Em relação ao aspecto visual, o material da bombona B9 aparentava estar mais seco do que o da bombona B3 durante a maior parte do tempo. Foi observada a presença de alguns insetos (moscas pequenas, principalmente) em ambas as bombonas - pouca quantidade, em comparação à etapa preliminar, não dificultando qualquer manipulação do material. Na semana 4, foi observada na bombona B3 a presença de algumas plântulas em germinação, indicando que, ao menos nessa bombona, não houve inativação total de sementes por aumento da temperatura. Em ambas as bombonas, após algumas semanas (2-3) de operação, o material já apresentava coloração marrom-escura,

sendo que a grande maioria do conteúdo ainda visualmente identificável consistia em cavacos de madeira, os quais, conforme já esperado, tendem a sofrer degradação mínima em um ciclo de compostagem, podendo ser separados do composto final por peneiramento e reaproveitados em ciclos de compostagem subsequentes, servindo como inóculo de microrganismos, além de agente estruturante (GRAVES *et al.*, 2010).

3.4 COMPOSTO

A Figura 10 mostra o aspecto visual do material compostado e peneirado após 2 meses do início da operação (ou seja, com 1 mês de aeração) em cada bombona. Inicialmente, após dispostas todas as cargas, o material em cada bombona tinha cerca de 46 cm de altura; após 2 meses, houve uma redução de cerca de 37% na bombona B9 e de 39% na bombona B3 na altura do material. Os resultados da análise de C e N do composto resultante de cada bombona com 1 mês de aeração são apresentados na Tabela 2. Conforme observado, em comparação à mistura inicial, houve um aumento na relação C/N do material das duas bombonas, uma vez que houve mais perda de N do que de C durante o processo.

Tabela 2 – Resultados da análise de C e N no composto com 1 mês de aeração peneirado		
PARÂMETRO	BOMBONA B9	BOMBONA B3
Carbono orgânico – % (m/m)	37	37
Nitrogênio (TKN) – % (m/m)	0,78	0,64
Relação C/N	47,4	57,8

Obs. 2: Resultados expressos na amostra seca a 65 °C.
Obs. 3: Média de duas determinações. Fonte: O autor (2019).

Figura 10 – Composto em processo de peneiramento (malha de 6,3 mm).



A – Material da bombona B9 passado em peneira (à frente) e material retido (atrás).

B – Material da bombona B3 passado em peneira (à frente) e material retido (atrás).

Fonte: O autor (2019).

3.5 CONSIDERAÇÕES, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS

Ao se atingir temperaturas termofílicas (acima de 40 °C) durante a compostagem, ocorre a eliminação de microrganismos patogênicos (acima de 60 °C) e taxas ótimas de biodegradação (45-55 °C), conforme Beffa (2002). Pereira Neto (2007) também cita a importância de se atingir temperaturas termofílicas (45-65 °C) para a eliminação de ovos e larvas de invertebrados (por exemplo, insetos e helmintos) e de sementes de ervas daninhas. Ainda segundo Dinçer *et al.* (2003), todos os organismos patogênicos seriam eliminados ao se manter a temperatura de 55 °C por 3 dias. Dessa forma, seria importante atingir temperaturas termofílicas não somente para se aproximar mais das condições de compostagem em grande escala, mas também para garantir a higienização do composto final. Relacionado a isso, Petiot & De Guardia (2004) descreve que um dos principais fatores a se considerar no *design* de protótipos de compostagem em pequena escala é a transferência de calor entre os materiais. Segundo estes autores, uma vez que a produção de calor no material é diretamente proporcional

ao volume de material biodegradável (maior volume, mais microrganismos em atividade) e as perdas de calor são diretamente proporcionais à superfície do volume de material (sendo o aumento da temperatura resultante do calor acumulado no balanço entre esses processos), um importante fator a se considerar na escolha do formato de reatores biológicos é a relação área de superfície por volume (A/V), sendo que reatores verticais com formato cilíndrico costumam apresentar uma boa relação A/V , em comparação a outros formatos. Assim, uma relação A/V menor representa maior possibilidade de aumento na temperatura, sendo que para este formato, o aumento no volume do material diminui a relação A/V .

Neste estudo não foram registradas temperaturas termofílicas; porém, conforme já exposto, é possível que o material tenha atingido temperaturas nessa faixa durante o período inicial, antes da inserção dos termo-higrômetros. Por outro lado, é possível que devido ao baixo volume de material compostado (cerca de 129 L por bombona), bem como devido a outras condições das bombonas relacionadas à capacidade de retenção de calor, não tenha sido viabilizado o acúmulo de calor no material de forma suficiente para se atingir temperaturas termofílicas. Assim, futuramente deve ser avaliada a compostagem nas bombonas com operação no limite máximo da capacidade volumétrica (cerca de 170 L por bombona), diminuindo assim a relação A/V , além de se realizar o monitoramento da temperatura durante todo o ciclo, a fim de se avaliar de forma mais conclusiva a capacidade térmica deste protótipo de compostagem.

Quanto à umidade do material, possíveis medidas para se minimizar as perdas de água seriam: realizar a cobertura das bombonas com material impermeável (com uma lona, por exemplo, como era realizado na compostagem em maior escala durante o período de funcionamento da unidade de compostagem da Roselândia, em Novo Hamburgo/RS, conforme Fricke & Santen - 2005); diminuir a aeração do material, isto é, a intensidade de operação dos sopradores, sendo para isso importante avaliar a vazão do ar que chega ao material, de forma a se obter parâmetros concretos sobre a quantidade ótima de ar necessária para o processo, o que não foi possível durante este experimento. Além disso, outro fator a ser repensado em relação a esse parâmetro seria a composição dos materiais iniciais, uma vez que a alta proporção de cavacos de madeira utilizada pode ter contribuído também para a diminuição do teor de umidade no material em compostagem, de forma que talvez a utilização de uma terceira fonte de material para o balanço da relação C/N na mistura inicial - o que permitiria a

diminuição na proporção de cavacos de madeira empregada – fosse uma alternativa para isso. Porém, para fins de aproximação do processo empregado em maior escala, deve-se buscar o emprego de fontes semelhantes às disponíveis nesses locais, como por exemplo capim, esterco ou outro resíduo de fácil obtenção.

Conforme constatado pela análise dos sopradores em assistência técnica, o motivo que levou à queima destes dois equipamentos entre os dias 2 e 3 de novembro (o problema só foi observado no dia 4 de novembro, uma segunda-feira) foi uma descarga elétrica. Assim, considerando que nestes dias ocorreram fortes tempestades, é bastante provável que esta tenha sido a causa primária da descarga elétrica, seja por incidência de raio ou por algum pico de energia gerado na rede após uma queda no fornecimento, por exemplo. Dessa forma, ressalta-se a importância de se desenvolver um sistema de proteção a distúrbios na rede elétrica em sistemas automatizados, de forma a se prevenir prejuízos com equipamentos e com a descontinuação dos processos.

Segundo Beffa (2002), o controle automatizado da aeração pode ser realizado a partir da variação na temperatura do material, de forma que se acionando a aeração numa temperatura de aproximadamente 60 °C, há manutenção de altas taxas de biodegradação, ao menos durante a fase termofílica; entretanto, no início do processo (fase mesofílica), o controle da aeração pela temperatura pode não satisfazer a demanda microbiológica de O₂. Assim, outro possível aprimoramento futuro seria a implementação do controle da frequência e da intensidade de aeração de acordo com a temperatura do material em compostagem, o que poderia minimizar os gastos com energia elétrica, otimizando o funcionamento dos sopradores de acordo com a demanda de aeração em tempo real.

4 CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos, o protótipo desenvolvido apresenta potencial para a realização de ensaios científicos sobre compostagem com aeração forçada. Entretanto, ainda são necessários aprimoramentos, de forma a assegurar o funcionamento adequado dos sopradores e a melhorar as condições gerais para a otimização do processo de compostagem, bem como em relação à fidelidade com que são reproduzidos os parâmetros de execução do processo no protótipo em comparação ao processo em maior escala, além de aspectos relacionados à reprodutibilidade dos ensaios realizados no protótipo.

Esta metodologia requer materiais de baixo custo para a sua implementação, o que é apropriado à realidade atual da ciência brasileira, considerando a escassez de recursos públicos destinados para a pesquisa, em termos gerais. Espera-se que, dessa forma, após a realização de correções e aprimoramentos futuros, possa servir como modelo para a execução de estudos de compostagem com aeração forçada em escala laboratorial, os quais podem ser importantes para viabilizar técnica e economicamente a implementação deste método de compostagem na gestão da fração orgânica dos RSU no Brasil.

REFERÊNCIAS

ABREU, M.F. de; ANDRADE, J.C. de; FALCÃO, A. de A. Protocolos de Análises Químicas. *In: Análise química de resíduos sólidos para monitoramento e estudos agroambientais*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2006. cap. 9, p. 121-158.

AMADEU, M. S. U. S.; MENGATTO, A. P. F.; STROPARO, E. M.; de ASSIS, T. T. S. *Manual de normalização de documentos científicos* - de acordo com as normas da ABNT. Curitiba: Editora UFPR, 2015. 327p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 21p.

BEFFA, T. The composting biotechnology: A microbial aerobic solid substrate fermentation complex process. *The composting process and management*. Bevaix: MADEP S.A. & COMPAG TECHNOLOGIES INTERNATIONAL, 2002. Disponível em: <<https://www.madep-sa.com/wp-content/uploads/2018/05/THE-COMPOSTING-BIOTECHNOLOGY-T.Beffa-MADEP-Complete-2002.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

BERNARDO, W. M.; NOBRE, M. R. C.; JATENE, F. B. A prática clínica baseada em evidências: parte II - buscando as evidências em fontes de informação. *Rev. Assoc. Med. Bras.*, São Paulo, v. 50, n. 1, p. 104-108, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-42302004000100045>>. Acesso em: 4 nov. 2019.

BIBENG – Biblioteca da Escola de Engenharia UFRGS. *Manual de NORMALIZAÇÃO de trabalhos acadêmicos*. Porto Alegre: Biblioteca da Escola de Engenharia UFRGS, 2019. 113p.

BRASIL. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. *Diário Oficial da União*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2012. 103p. Disponível em: <https://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos_diversos_do_portal/PNRS_Revisao_Decret_o_280812.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2019.

BRASIL. MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos*. Brasília: MAPA, 2014. 220p. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/laboratorios/arquivos-publicacoes-laboratorio/manual-in-5-analiticos-oficiais-para-fertilizantes-e-corretivos_com_capa_final_03.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2019.

BRASIL. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos* - 2016. Brasília: Ministério das Cidades, 2018. 188p. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2016>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

BREMNER, J.M.; MULVANEY, C.S. Nitrogen-total. *In: PAGE, A.L. (Ed.). Methods of soil analysis* - pt.2. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p.595-624.

DIAZ, L. F.; SAVAGE, G. M.; EGGERTH, L. L. Composting. *In: Solid Waste Management*. Paris: United Nations Environment Programme, 2005. cap. 8, p. 197-235.

DINÇER, S.; GÜVENMEZ, H.; ÇOLAK, Ö. Mesophilic composting of food waste and bacterial pathogen reduction. *Annals of Microbiology*. 53 (3), p. 267-274. 2003.

Disponível em:<

https://www.researchgate.net/publication/288545347_Mesophilic_composting_of_food_waste_and_bacterial_pathogen_reduction>. Acesso em: 27 nov. 2019.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. *Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos*. PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 1999. 91p. Disponível em: <https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/Livro_Compostagem.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2019.

FRICKE, K.; SANTEN, H. *Pre-Feasibilitystudie Anwendung von Methanoxidationsfiltern für die Deponie Roselândia, Novo Hamburgo, Brasilien*. Braunschweig: Universidade Técnica de Braunschweig, 2005.

GRAVES, R.E.; HATTEMER, G.M.; STETTLER, D.; KRIDER, J.N.; CHAPMAN, D. Composting. *In: National Engineering Handbook – Part 637*. Washington, DC: USDA – United States Department of Agriculture, 2010. Disponível em: <<https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=28910.wba>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

HAUG, R.T. Composting process design criteria. *BioCycle*, EUA. vol. 27, p. 53-57, 1986.

MOON, P. *ASP COMPOSTING WEBINAR: PART 1 – INTRODUCTION AND OVERVIEW*. O2Compost. EUA, 2017. 24 min. Disponível em: <<https://www.o2compost.com/asp-composting-webinar-pt1.aspx>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

PEREIRA NETO, J. T. *Manual de Compostagem: processo de baixo custo*. Viçosa: Editora UFV (Universidade Federal de Viçosa), 2007. 81p.

PETIOT, C. & DE GUARDIA, A. Composting in a Laboratory Reactor: A Review. *Compost Science and Utilization*. vol. 12, nº 1, 69-79. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1065657X.2004.10702160>. Acesso em: 21 nov. 2019.

PHILLIP, E.A. *The Design and Construction of a Pilot-Scale Compost Reactor for the Study of Gas Emissions from Compost under Different Physical Conditions*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Recursos Biológicos, Universidade McGill. Montreal, 2010. Disponível em: <http://digitool.library.mcgill.ca/webclient/StreamGate?folder_id=0&dvs=1574364101527~260>. Acesso em: 21 nov. 2019.

RYNK, R. (Ed.); van de KAMP; WILSON, J. B.; SINGLEY, M. E.; RICHARD, T. L.; KOLEGA, J. J.; GOUIN, F. R.; Jr. LALIBERTY, L.; KAY, D.; MURPHY, D. W.; HOITINK; H. A. J.; BRINTON, W. F. *On-Farm Composting Handbook*. Nova Iorque: Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES), 1992. 186p. Disponível em: < <https://hdl.handle.net/1813/67142>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

SCHIRALDI, C. & DE ROSA, M. Mesophilic Organisms. *In: Encyclopedia of Membranes*. Berlim: Editora Springer, 2014.

SOUZA, A.L.K.; RUFATTO, L.; COSTA,V.B.; RUFATTO, A.R.; SIMÕES, F. Compostagem com aeração forçada como alternativa de aproveitamento dos resíduos gerados pela agroindústria conserveira. *R. Bras. Agrociência*. v.16, n.1-4, p.69-75. Pelotas, 2010. Disponível em: < <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/883032>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

USA. U.S. EPA - United States Environmental Protection Agency. *Method 9045 C: Soil and Waste pH*. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1995. Revision 3. 5p. Disponível em: <https://archive.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/web/pdf/method%209045c%2C%20revision%203%20-%201995.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2019.

WALKLEY, A. & BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. v. 37, p.29-38. jan.,1934. Disponível em: <https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1934/01000/AN_EXAMINATION_OF_THE_DEGTJAREFF_METHOD_FOR.3.aspx>. Acesso em: 7 jan. 2020.