

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS LONDRINA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

RAFAELA GASPAROTTO MOSER

**EFEITO DA ADIÇÃO DA CASCA DE AVEIA EM BIOPOLÍMEROS
COMPOSTADOS COM RESÍDUOS ORGÂNICOS E PODA DE
ÁRVORES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

LONDRINA

2017

RAFAELA GASPAROTTO MOSER

**EFEITO DA ADIÇÃO DE CASCA DE AVEIA EM BIOPOLÍMEROS
COMPOSTADOS COM RESÍDUOS ORGÂNICOS E PODA DE
ÁRVORES**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina de TCC2, do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tatiane Cristina Dal Bosco.

Co-orientador: Prof^o. Dr. Janksyn Bertozzi.

LONDRINA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná
Campus Londrina
Coordenação de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

Efeito da adição de casca de aveia em biopolímeros compostados com resíduos orgânicos e poda de árvores

por

Rafaela Gasparotto Moser

Monografia apresentada no dia 20 de novembro de 2017 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Kátia Valéria Marques Cardoso Prates
(UTFPR)

Prof. Dr. Ajadir Fazolo
(UTFPR)

Profa. Dra. Tatiane Cristina Dal Bosco
(UTFPR)
Orientadora

Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, Aquele que me deu o dom da vida e me ajudou em todas as minhas dificuldades e medos, por me permitir estar aqui vivendo essa grande vitória em minha vida.

Agradeço aos meus pais, Luci e Valdinei, por não terem medido esforços para me dar a melhor educação e as melhores oportunidades, pelo apoio, paciência e todo amor que sempre me deram. À minha vó Harlet, por sempre estar comigo, nos momentos difíceis e alegres e me colocar sempre em suas orações. Agradeço ao meu irmão, Guilherme, e meu tio, Luiz Fernando, pela torcida e incentivo.

Ao grande amor da minha vida, Renan, agradeço pelo carinho, apoio, paciência, companheirismo e palavras de incentivo durante toda a minha vida acadêmica.

Um agradecimento especial à minha orientadora, Professora Doutora Tatiane Cristina Dal Bosco, por acreditar em mim desde o início. Pela compreensão nos momentos difíceis, pela ajuda, amizade e empenho não só nesse trabalho, mas também em outros momentos da minha vida acadêmica. Agradeço também ao meu co-orientador, Professor Doutor Janksyn Bertozzi, pelas suas contribuições, por partilhar seus conhecimentos e estar sempre disponível para ajudar.

Agradeço ao Professor Doutor Fábio Yamashita por disponibilizar os biopolímeros para a realização desse trabalho. Agradeço à Professora Doutora Elizabeth Mie Hashimoto pela ajuda nas análises estatísticas, ao professor Doutor Renato Márcio Ribeiro Viana pela ajuda na interpretação dos dados, à Doutora Ana Paula Bilck por nos disponibilizar as imagens de MEV, ao Professor Doutor Roger Nabeyama Michels por disponibilizar os sensores e o sistema arduíno para a realização desse trabalho e me ajudar nas análises estatísticas. Minha gratidão ao Professor Doutor Cláudio Takeo Ueno e à Professora Lyssa Setsuko Sakanaka por ceder seu tempo e me ajudar na análise de microscopia óptica para enriquecer ainda mais meu trabalho. Também agradeço à Prof. Doutora Kátia Valéria Marques Cardoso Prates e ao Prof. Doutor Ajadir Fazolo pelas contribuições na banca de TCC 1 e TCC 2.

Agradeço aos alunos de iniciação científica, Andressa Ferreira Pimenta, Marcos Cândido da Silva, Giovanni Terra Peixoto e Leonardo Galice Chives, por dedicar seu tempo e pelo empenho nesse trabalho. Sou muito grata a vocês por toda a ajuda; sem vocês esse trabalho não seria possível. Agradeço à Desiree, minha companheira nesse trabalho, por toda ajuda, conselhos, carinho e amizade.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos que sempre torceram por mim e me acompanharam durante minha vida acadêmica e aos meus professores por todo conhecimento compartilhado.

Meu muito obrigada a todos!

“Só quando a última árvore for derrubada, o último peixe for morto e o último rio for poluído é que o homem perceberá que não pode comer dinheiro.”

(Provérbio Indígena)

RESUMO

MOSER, Rafaela G. **Efeito da adição de casca de aveia em biopolímeros compostados com resíduos orgânicos e poda de árvores.** 2017. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso - (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2017.

Os biopolímeros tornam-se cada vez mais importantes para a produção de embalagens que facilitem o posterior gerenciamento dos resíduos, em especial os orgânicos em usinas de compostagem. Neste estudo objetivou-se avaliar a compostabilidade de biopolímeros produzidos a partir de amido com e sem a adição de casca de aveia, em processo de compostagem de resíduos orgânicos domiciliares com poda de árvores. A compostagem teve duração de 60 dias e foi realizada em reatores de 100 L, sendo que 30 L foram ocupados com resíduos orgânicos domiciliares e 66 litros com poda de árvore. O experimento foi realizado em duplicata, sendo os tratamentos os tipos de biopolímeros (com e sem adição de casca de aveia) e a testemunha (sem biopolímeros). Foram monitorados os seguintes parâmetros ao longo da compostagem: temperatura, relação C/N, carbono orgânico total, nitrogênio total, pH, condutividade elétrica, série de sólidos, umidade, teor de micro e macronutrientes do composto final e redução de massa e volume. A degradação dos biopolímeros ao final do experimento foi analisada com o auxílio de registros fotográficos e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os biopolímeros não influenciaram no comportamento da temperatura e a fase termofílica durou cerca de 11 dias; o pH foi estabilizado próximo a 9 e a condutividade elétrica foi maior ao final do processo. Houve redução dos sólidos voláteis, da relação C/N, do volume e da massa dos compostos. Nos registros fotográficos notou-se que o biopolímero sem casca de aveia degradou mais que o com casca de aveia e nas imagens de MEV observou-se rachaduras, orifícios e superfícies irregulares, que não existiam nos biopolímeros antes da compostagem. Conclui-se que a presença dos biopolímeros não interferiu no processo de compostagem e nem na qualidade do composto final. E o tempo de compostagem não foi o suficiente para degradar completamente os biopolímeros.

Palavras chaves: Compostagem. Compostabilidade. Tratamento de resíduos sólidos.

ABSTRACT

MOSER, Rafaela G. **Effect of the addition of oat straw on biopolymers composted with organic waste and pruning trees.** 2017. 85 p. Course Conclusion Work - (Bachelor of Environmental Engineering), Federal Technological University of Parana (UTFPR).

Biopolymers become increasingly important to the package production that makes easy the waste management, especially the organics in composting plants. The present study intends to evaluate the compostability of biopolymers made from starch with and without oat straw addition, in composting process with domestic organic waste and tree pruning. The composting lasted 60 days and was made in 100 L reactors, being that 30 L was domestic organic waste and 66 L was pruning tree. The experiment was made in duplicate, being the treatments the types of biopolymers (with and without oat straw addition) and the witness (without biopolymers). Were monitored the following parameters along the composting: temperature, C/N ratio, total organic carbon, total nitrogen, pH, electrical conductivity, solids, humidity content, micro and macronutrients and weight and volume reduction. At the end of the process, biopolymers degradation was analyzed with the assistance of photographic records and scanning electron microscopy. The biopolymers didn't act upon temperature parameter and the thermophilic phase was observed for about 11 days; the pH was stabilized near to 9 e the electrical conductivity was higher at the end of the process. There was a reduction of volatile solids, C/N ratio, volume and mass of the compounds. The photographic records showed that the biopolymer without oat straw degraded more than the biopolymer with oat straw and the scanning electron microscopy images showed cracks, holes and irregular surfaces that didn't exist on the biopolymer before the composting. It is concluded that the presence of the biopolymers didn't interfere in the composting or in the final compound quality. And the composting time wasn't enough to completely degrade the biopolymers.

Keywords: Composting. Compostability. Treatment of solid waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição gravimétrica do resíduo sólido urbano coletado em 2012 no Brasil	19
Figura 2 – Hierarquia de prioridades para o gerenciamento dos resíduos sólidos ..	20
Figura 3 - Fases da compostagem.....	24
Figura 4 - Plásticos mais consumidos no Brasil	30
Figura 5 - Diferentes estágios de degradação de PBAt/amido durante o processo de compostagem.....	35
Figura 6 - Disposição dos tratamentos na estufa	38
Figura 7 - Esquematização das camadas das bombonas.....	41
Figura 8 - Temperatura média durante o processo de compostagem.....	45
Figura 9 - Variação temperatura máxima ao longo o processo de compostagem ..	47
Figura 10 - Perfil da temperatura mínima ao longo o processo de compostagem ..	48
Figura 11- Perfil médio com erro padrão da temperatura média (°C) no reator ao longo do mês de abril (a), maio (b) e junho (c).....	49
Figura 12- Gráficos de normalidade dos resíduos – dados de temperatura referentes ao mês de abril.....	50
Figura 13- Gráficos de normalidade dos resíduos – dados de temperatura referentes ao mês de maio.....	54
Figura 14- Gráficos de normalidade dos resíduos – dados de temperatura referentes ao mês de junho.....	56
Figura 15 – pH médio durante a compostagem: (a) aos 18 dias, (b) aos 32 dias, (c) aos 46 dias, (d) aos 60 dias	62
Figura 16 – Condutividade elétrica média ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) dos tratamentos durante a compostagem: (a) aos 18 dias, (b) aos 32 dias, (c) aos 46 dias, (d) aos 60 dias ...	64
Figura 17 - - Umidade, Sólidos totais, Sólidos fixos e Sólidos voláteis da poda, RO (resíduo orgânico) antes do processo de compostagem e compostos dos tratamentos T0, T1 e T2 em 18 dias, 32 dias, 46 dias e 60 dias após o início da compostagem.....	66
Figura 18 – Redução média de volume dos reatores durante o processo de compostagem e comparação estatística pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.....	70
Figura 19 - Redução média de massa ao final do processo de compostagem	71

Figura 20 - Composto Final	72
Figura 21 - Registros Fotográficos dos biopolímeros inicial e ao final do processo da compostagem.....	73
Figura 22 - Imagens de MEV dos biopolímeros com e sem casca de aveia antes e após a compostagem	74
Figura 23 - Imagens de MEV dos biopolímeros com a casca de aveia antes e após a compostagem.....	75
Figura 24 - Superfície do biopolímero sem casca de aveia onde se observam hifas.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formulação dos biopolímeros compostados	37
Tabela 2 - Características iniciais dos resíduos	39
Tabela 3 - Composição dos reatores para diversas relações C/N	40
Tabela 4 - Frequência de monitoramento dos parâmetros da compostagem	42
Tabela 5 - Teste de Normalidade dos dados do mês de abril	50
Tabela 6 - Análise de variância mediano mês de abril	50
Tabela 7 - Análise de variância do tempo dentro dos níveis de tratamento no mês de abril	51
Tabela 8-Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T0 para o mês de abril	51
Tabela 9-Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T1 no mês de abril.....	51
Tabela 10- Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T2 no mês de abril.....	52
Tabela 11 - Teste de normalidade no mês de maio	53
Tabela 12 - Análise de variância da temperatura média no mês de maio.....	54
Tabela 13 – Comparação múltipla do tempo na temperatura no mês de maio	55
Tabela 14 - Teste de normalidade no mês de junho	56
Tabela 15 - Análise de variância da temperatura média no mês de junho	56
Tabela 16- Análise de variância do tempo dentro dos níveis do tratamento no mês de junho	57
Tabela 17 - Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T0 para o mês de junho	57
Tabela 18- Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T1 no mês de junho.....	58
Tabela 19- Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T2 no mês de junho.....	59
Tabela 20 - Teores de Carbono orgânico total, Nitrogênio total e relação C/N inicial dos resíduos após 32, 46 e 60 dias de compostagem dos tratamentos.....	60
Tabela 21 - Análise estatística para valores de pH	63
Tabela 22 - Análise estatística para valores de condutividade elétrica	65
Tabela 23- Análise estatística para valores da série de sólidos	68

Tabela 24 – Teores de micro e macronutrientes dos compostos finais.....69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	17
3.2 COMPOSTAGEM	21
3.2.1 Aeração	22
3.2.2 Temperatura	23
3.2.3 Umidade	25
3.2.4 Relação C/N.....	25
3.2.5 Granulometria	27
3.2.6 Potencial Hidrogeniônico (pH)	27
3.2.7 Microrganismos.....	28
3.3 BIOPOLÍMEROS	29
3.4 COMPOSTABILIDADE DE BIOPOLÍMEROS	33
4 MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS E RESÍDUOS.....	37
4.2 TRATAMENTOS E DIMENSIONAMENTO DOS REATORES	38
4.3 PREPARAÇÃO DO MATERIAL E MONTAGEM DAS BOMBONAS	40
4.4 MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS DA COMPOSTAGEM	42
4.5 MONITORAMENTO DOS BIOPOLÍMEROS	43
4.5.1 Registros Fotográficos	43
4.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	43
4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 TEMPERATURA.....	45
5.2 ANÁLISES FÍSICOS-QUÍMICAS	59
5.2.1 Carbono Orgânico Total, Nitrogênio Total e Relação C/N	59
5.2.2 pH	61

5.2.3 Condutividade Elétrica	63
5.2.4 Série de Sólidos.....	65
5.3 MICRO E MACRONUTRIENTES	69
5.4 REDUÇÃO DE MASSA E VOLUME	69
5.5 DESCARACTERIZAÇÃO DA PODA E DO RESÍDUO ORGÂNICO	71
5.6 DEGRADAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS.....	72
5.6.1 Registros Fotográficos	72
5.6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura	74
6 CONCLUSÃO.....	77
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos orgânicos representam 51% dos resíduos urbanos gerados no Brasil (ABRELPE, 2013). Nesse sentido, se faz necessário buscar alternativas de tratamento e gerenciamento para que os resíduos recicláveis e orgânicos não sejam dispostos em aterros sanitários como se fossem rejeitos e ocupem espaços desnecessários.

A Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, estabelece a hierarquia a ser seguida no gerenciamento de resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, por fim, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). Estabelece também, no artigo 36, a compostagem como estratégia prioritária para o tratamento para os resíduos orgânicos (BRASIL, 2010). Recentemente foi publicada a Resolução CONAMA 481/2017 (BRASIL, 2017) que reforça a importância da implantação de sistemas de compostagem e estabelece critérios para a sua realização, visando à proteção do meio ambiente e o reestabelecimento do ciclo natural da matéria orgânica e seu papel natural de fertilizar os solos.

Quando separados na fonte, os resíduos orgânicos podem ser transformados em matéria orgânica humificada pelo processo da compostagem. A compostagem resulta em muitos benefícios como a reciclagem de nutrientes e o aumento da vida útil dos aterros sanitários (EPSTEIN, 1997).

Apesar disso, somente 2,8% dos resíduos coletados no Brasil são destinados a usinas de compostagem (BARREIRA, 2005). Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS, 2017), em 2015 existiam somente 65 usinas de compostagem em todo o território brasileiro.

Um dos problemas que limitam a realização da compostagem em escala municipal é a segregação inadequada dos resíduos por parte da população. Em geral, os resíduos orgânicos são acondicionados em sacolas plásticas e misturados com outros tipos de resíduos, e na maioria das vezes, essa separação é técnica e economicamente inviável. Compostar o resíduo orgânico juntamente com as sacolas plásticas reduz a eficiência do processo, uma vez que essas sacolas são feitas geralmente de polietileno, um polímero não biodegradável. Ainda deve-se destacar que o composto final fica repleto de fragmentos plásticos, dificultando ou, muitas vezes, inviabilizando sua aplicação ao solo.

Neste sentido, os biopolímeros tornam-se cada vez mais importantes para a produção de embalagens que facilitem o posterior gerenciamento dos resíduos. São obtidos a partir de materiais advindos de fontes renováveis e podem ser biodegradados em ambientes como o solo e leiras/reatores de compostagem (KALE et al., 2007).

Assim, estudos têm sido feitos na busca do desenvolvimento de materiais biodegradáveis e compostáveis, a partir de fontes renováveis. Na Universidade Estadual de Londrina, o grupo de Inovação e Desenvolvimento Tecnológico do Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia vem estudando biopolímeros de interesse industrial e sua aplicação em embalagens e filmes. Os seus mais recentes estudos tiveram foco na produção de laminados de blendas de PLA (poliácido láctico) e amido termoplástico (NASCIMENTO et al., 2016; SHIRAI et al., 2016; SOUZA et al., 2016; SUEIRO et al., 2016; OLIVATO et al., 2017).

Os resíduos lignocelulósicos aumentam a flexibilidade dos biopolímeros e a resistência à umidade, tornando esse material com propriedades químicas e físicas mais próximas às embalagens convencionais (SALGADO et al., 2008). Diversos materiais podem ser utilizados em sua produção, como é o caso de bagaço de cana (TITA et al., 2002), casca de café (MACHADO et al., 2010) e aveia (FURLAN et al., 2012; DEBIAGI et al., 2013). A casca de aveia é um resíduo da agroindústria que, além de ser gerado em grandes quantidades, não tem valor econômico e precisa ser destinado. A adição desse resíduo para reforçar biopolímeros feitos a partir de amido é uma alternativa de destinação.

Testes de compostabilidade são importantes para verificar a viabilidade do incremento deste resíduo na produção de biopolímeros. Caso seja comprovada sua viabilidade em termos de compostabilidade, este material poderia ser utilizado na produção de filmes para acondicionar resíduos sólidos orgânicos e ser facilmente incorporado à compostagem em grande escala, diminuindo esforços e custos com a operação das usinas de tratamento.

Deste modo, o presente estudo tem como objetivo avaliar a compostabilidade de biopolímeros produzidos a partir de amido com e sem a adição de casca de aveia, em processo de compostagem de resíduos orgânicos domiciliares e poda de árvores.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a compostabilidade de biopolímeros produzidos a partir de amido, com e sem a adição de casca de aveia, em processo de compostagem de resíduos orgânicos domiciliares e poda de árvores.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Monitorar o desempenho da compostagem de resíduos orgânicos domiciliares, poda de árvores e biopolímeros, por meio dos parâmetros temperatura, pH, condutividade elétrica, umidade, sólidos fixos, sólidos voláteis, carbono orgânico total e nitrogênio total.
- Avaliar as reduções de massa, volume e relação C/N do composto ao longo e ao final da compostagem.
- Avaliar a descaracterização física e visual dessas embalagens.
- Observar se houve modificação na estrutura dos biopolímeros após a compostagem por meio de microscopia eletrônica de varredura.
- Verificar a qualidade nutricional do composto final

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

A norma NBR 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), apresenta a definição de resíduos sólidos:

Resíduos sólidos ou semissólidos oriundos de diversas atividades, como a doméstica, industrial, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, além de lodos e outros líquidos que sejam impróprios para despejo em corpos hídricos ou esgotos (ABNT, 2004, p.1).

Os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com a sua origem e quanto à sua periculosidade. Quanto à origem podem ser classificados da seguinte maneira (BRASIL, 2010):

- i) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- ii) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- iii) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “i” e “ii”;
- iv) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços;
- v) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico;
- vi) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- vii) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde;
- viii) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil;
- ix) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais;
- x) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- xi) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

A classificação segundo a periculosidade dos resíduos está prevista na NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004):

- Classe I – Perigosos: aqueles que causam risco à saúde pública ou ao meio ambiente, ou seja, apresentam alguma periculosidade, a partir de características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.
- Classe II - Não Perigosos:
 - Classe IIA - Não Inertes: são aqueles que não são classificados como Perigosos e tem características de biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água.
 - Classe IIB – Inertes: são aqueles que em contato com a água não alteram os padrões de potabilidade, exceto cor, turbidez, dureza e sabor.

Com aumento da industrialização, após a Revolução Industrial, houve um aumento da população e, conseqüentemente, aumentou-se a geração de resíduos sólidos. Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016), o Brasil gerou em 2015 aproximadamente 79,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU). No ano de 2014 foram geradas 215.297 toneladas por dia de RSU; em 2015 esse número passou para 218.874 toneladas por dia, o que resultou num incremento de aproximadamente 1,7% em relação ao ano anterior, levando em conta que no mesmo período a população brasileira cresceu 0,8% (ABRELPE, 2016).

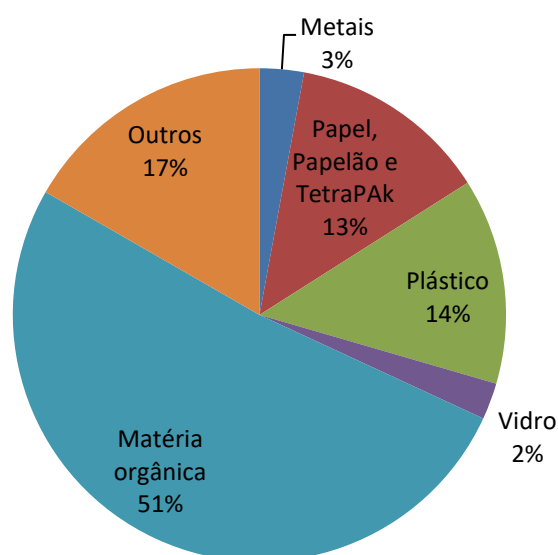
Entre os anos de 2015 e 2016, apesar da população brasileira continuar crescendo no mesmo ritmo, a geração total de resíduos sólidos teve uma queda de aproximadamente 2% no mesmo período. Em 2015, houve uma produção de 218.874 toneladas por dia e em 2016 produziu-se aproximadamente 214.405 toneladas por dia, isso pode estar associado à crise econômica, que diminuiu o poder de compra dos brasileiros, trazendo como consequência menor consumo (ABRELPE, 2017).

Na região Sul do país foi gerado, em 2016, o total de 22.581 toneladas por dia de resíduos sólidos, o que corresponde a uma queda de 2% em relação ao ano de 2015 (ABRELPE, 2016). Na cidade de Londrina, considerando a sua população, estima-se que a massa de resíduos coletados *per capita* varie entre 0,75 kg/hab.dia e 1,00 kg/hab. dia (SNIS, 2017).

Os resíduos sólidos são compostos de vários tipos de materiais como: papéis, metais, plásticos, vidros, matéria orgânica e rejeitos. Essa composição varia de acordo com a situação econômica e cultural das regiões, o tamanho da cidade, épocas do ano, entre outras variáveis (FARIAS e JUCÁ, 2000). A composição gravimétrica dos resíduos é um indicador muito importante na compreensão da taxa de decomposição do resíduo sólido e da produção de chorume, e expressa, em porcentual, a quantidade de cada componente em relação à quantidade total da amostra (MELLO e JUCÁ, 2000).

Como pode-se perceber na Figura 1 (ABRELPE, 2013), a matéria orgânica corresponde a 51,4% do total de RSU no Brasil. Isso equivale a aproximadamente 29 milhões de toneladas de matéria orgânica gerados ao ano em residências e estabelecimentos comerciais nos municípios.

Figura 1 - Composição gravimétrica do resíduo sólido urbano coletado em 2012 no Brasil



Fonte: ABRELPE (2013).

Em 2 de agosto de 2010 foi publicada a Lei Federal nº 12.305 que dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos – PNRS. Nela são reunidos os princípios, objetivos, instrumentos e metas para a gestão integrada e gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil (BRASIL, 2010).

O gerenciamento de resíduos sólidos engloba as ações que beneficiem a saúde pública e o meio ambiente, como o controle da geração, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e disposição de resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

No artigo 9º da PNRS é apresentada a ordem de prioridade das ações de gerenciamento de resíduos sólidos. Essa hierarquia é apresentada na Figura 2. A não geração significa evitar a geração e atividades que produzam resíduos sólidos. A redução consiste em gerar a mínima quantidade de resíduos possível. A reutilização é o reaproveitamento ou reuso desses resíduos. A reciclagem ocorre quando se processam esses resíduos para que eles possam servir de matéria prima para outros produtos. O tratamento é a aplicação de tecnologias que visam transformar esse resíduo em um produto não danoso ao meio ambiente e à saúde pública, como a compostagem. Finalmente, quando não houver tecnologia disponível para tratamento desses resíduos gerados, a disposição final ambientalmente adequada deve ser realizada (BRASIL, 2010), nesta condição os resíduos são chamados de rejeitos.

Figura 2 – Hierarquia de prioridades para o gerenciamento dos resíduos sólidos



Fonte: Adaptado de BRASIL (2010).

Apesar dos resíduos sólidos apresentarem alto percentual de matéria orgânica, ainda são poucos os municípios que realizam este tratamento e, desta forma, esses resíduos acabam sendo destinados a aterros sanitários (58,4% dos resíduos), aterros controlados (24,2% dos resíduos) ou até mesmo lixões (17,4% dos resíduos), juntamente com rejeitos (ABRELPE, 2017). Essa destinação gera altos custos para o município, que poderiam ser evitados caso a matéria orgânica pudesse ser separada na fonte e fosse encaminhada para tratamentos específicos como compostagem (IPEA, 2012). Estima-se que no Brasil haja 65 usinas de

compostagem, que processam 2,8% dos resíduos sólidos orgânicos produzidos no meio urbano (SNIS, 2017; BARREIRA, 2005).

Segundo Barreira (2005) o gerenciamento de resíduos sólidos é uma necessidade visível. Para um adequado gerenciamento é necessário realizar essas ações de maneira conjunta e não individualmente, como geralmente é feito pelos municípios brasileiros.

3.2 COMPOSTAGEM

Kiehl (2004) define compostagem como:

...um processo biotecnológico de decomposição aeróbia controlada e termofílica visando à estabilização da matéria orgânica mais rapidamente, com obtenção de um produto final estável, sanitizado, rico em compostos húmicos (KIEHL, 2004).

Com a compostagem é possível obter um composto rico em matéria humificada, com odor agradável, de fácil manipulação e livre de agentes patógenos (FERNANDES e SILVA, 1999). A principal vantagem da compostagem é transformar um resíduo em um composto útil, com volume reduzido. Por ser um tratamento simples, pequenos municípios e usinas podem realizá-las, minimizando seus impactos ambientais (EPSTEIN, 1997).

Os resíduos sólidos urbanos passíveis de compostagem podem ser divididos em duas formas: os resíduos ricos em carbono e os resíduos ricos em nitrogênio. Dentre os resíduos ricos em carbono estão as podas de árvores e jardins, papel e folhas secas; dentre os resíduos nitrogenados incluem-se restos de comida, lodos do tratamento de esgoto, entre outros (OLIVEIRA et al., 2008). O problema é que na maioria das vezes estes resíduos não são devidamente separados na fonte e chegam às usinas de compostagem contaminados por materiais inertes ou não inertes, como pilhas, baterias, plásticos, entre outros materiais (BARREIRA, 2005).

O processo pode ser dividido em duas etapas: a etapa de biodegradação do resíduo orgânico e a de maturação (MARAGNO et al., 2007). A compostagem consiste em fazer pilhas com o resíduo orgânico seco (palhas, folhagens, podas) e a matéria orgânica com alto teor de umidade, em camadas intercaladas.

Fatores químicos e físicos influenciam diretamente o processo: a temperatura, a umidade, a taxa de oxigênio, a relação C/N, a granulometria, o pH e os nutrientes disponíveis para os microrganismos. Sendo assim, é de extrema importância a análise físico-química da mistura inicial e o monitoramento desses parâmetros ao longo do processo de compostagem (VALENTE et al., 2009).

3.2.1 Aeração

Segundo Fernandes e Silva (1999) a aeração é fundamental para o processo, pois a compostagem é um processo aeróbio e, por conseguinte, os microrganismos necessitam de oxigênio para oxidar a matéria orgânica. Dessa maneira, a falta de oxigênio pode dificultar a atividade microbiana e prolongar a compostagem, assim como promover a geração de odores.

Segundo Barreira (2005) a aeração depende da granulometria dos resíduos tanto quanto da intensidade dos revolvimentos. O revolvimento deve ser feito quando as temperaturas estão muito elevadas, ou quando o composto estiver muito úmido ou, até mesmo, quando houver presença de odores (KIEHL, 1985).

O revolvimento introduz oxigênio e libera o ar saturado de gás carbônico que estava contido na leira/reator, gerado pela atividade microbiana. Faltando oxigênio no interior da compostagem haverá formação de dióxido de carbono e metano, propiciando a anaerobiose (MARAGNO et al., 2007).

Essa aeração pode ser feita de duas maneiras, naturalmente ou de modo forçado. No método natural, os resíduos são dispostos em leiras/reatores com revolvimentos periódicos realizados de maneira manual ou mecanizada, para que haja convecção do ar na massa do composto. No método de aeração forçada, o material é disposto sobre tubos perfurados por onde circula ar, por meio de bombeamento mecânico (PEIXE e HACK, 2014).

Segundo Gomes (2001) a taxa de oxigênio necessária para a oxidação dos compostos orgânicos pode ser definida a partir da composição química dos sólidos voláteis (SV) e seu grau de degradação durante o processo. Essa taxa pode variar entre 1,0 g de O₂ g⁻¹ de SV e 4,0 g O₂ g⁻¹ de SV. Gomez (2001) recomenda ainda que se proporcione mais oxigênio do que a taxa definida pelos sólidos voláteis, para que não haja anaerobiose.

3.2.2 Temperatura

Segundo Barreira (2005) a compostagem é caracterizada por ser um processo exotérmico de degradação dos resíduos orgânicos, pois gera calor e resulta no aumento da temperatura da leira.

A temperatura é considerada um dos mais importantes fatores da compostagem, pois é o indicador da eficiência do processo, uma vez que está ligada à atividade microbiana. Segundo Fernandes e Silva (1999) se a temperatura no terceiro dia estiver em torno de 40°C é sinal que o sistema está em equilíbrio e que provavelmente será bem-sucedido. Ao contrário, indica que alguns dos parâmetros estão fora do controle, limitando a atividade microbiana. A sanitização do processo depende das altas temperaturas e sua uniformidade por toda a leira, do tipo de leira e do tempo de exposição do material, já que poucos organismos patogênicos resistem a temperaturas entre 50° e 60°C (HECK et al., 2013).

Os intervalos de temperaturas ao longo do processo o dividem em fases: (1) Fase Termofílica; (2) Fase Mesofílica e (3) Fase de Maturação (PEREIRA NETO, 1996).

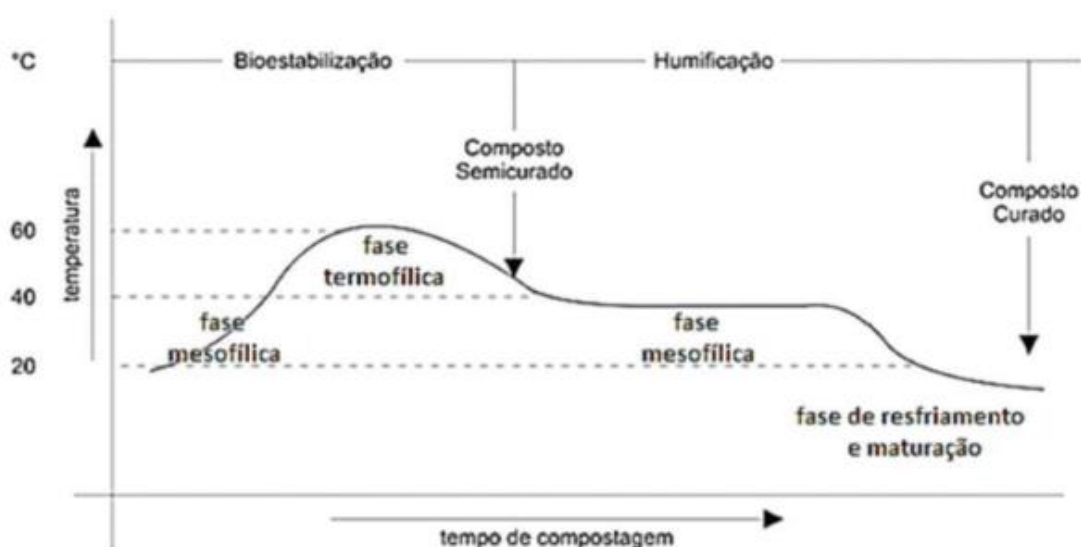
A fase termofílica é caracteriza por temperaturas entre 45° e 65° C, onde há intensa degradação microbiológica e alto consumo de oxigênio. Nessa fase pode ocorrer a eliminação de patógenos (SCHALCH et al., 2015).

De acordo a Resolução CONAMA nº 481, de 3 de outubro de 2017 (BRASIL, 2017) nos processos de compostagem de alto impacto ambiental e naqueles onde o composto final será comercializado, a fase termofílica deve ter tempo e temperatura mínima para inativação dos patógenos. Em sistemas fechados, a temperatura deve ser maior que 60°C durante 3 dias. Em sistemas abertos, a temperatura deve ser maior que 65°C durante 3 dias e maior que 55°C durante 14 dias de processo. Além disso, exige-se que durante o período da fase termofílica a temperatura seja registrada pelo menos uma vez ao dia (BRASIL, 2017).

A fase que antecede e sucede a fase termofílica pode ser chamada de fase mesofílica, com temperaturas entre 21° e 45°C. Esta fase ocorre no início da compostagem, dura poucos dias e dá as condições necessárias para que aconteça a compostagem. Em seguida, ocorre a fase de maturação, que é marcada pelo resfriamento e baixa atividade microbiana (MASSUKADO, 2008).

A fase da maturação é a fase final da compostagem e pode durar muitas semanas. Essa fase varia de acordo com o composto a ser degradado. A temperatura se iguala à ambiente e a quantidade de oxigênio requerida é menor (SCHALCH et al., 2015). Na Figura 3 é possível observar as três fases da compostagem em relação à temperatura e ao tempo de duração do processo, que pode variar de acordo com os resíduos utilizados e o tamanho dos reatores.

Figura 3 - Fases da compostagem



Fonte: Kiehl (1985).

Para controlar a temperatura utiliza-se o método de revolvimento de leira, aerando-a. Kiehl (2004) considera a faixa ótima de temperatura para compostagem entre 45° a 65°C e não recomenda que a temperatura da leira ultrapasse os 70° C, uma vez que pode haver diminuição da ação microbiana, insolubilização de proteínas e causar o desprendimento de amônia, podendo, inclusive, paralisar o processo.

É importante monitorar a temperatura, uma vez que esse parâmetro é determinante na inativação de patógenos, sementes e insetos e para a rápida degradação da matéria orgânica. Muitos autores a monitoram somente uma vez por semana, como Budziak et al. (2004); Fiori et al. (2008); Graepin et al. (2014); Barizon et al. (2017). Heck et al. (2013) monitoravam a temperatura apenas de 15 em 15 dias, porém, suas leiras tinham um volume muito grande e o tempo de compostagem durou mais de seis meses, fazendo com que as diferentes fases da

compostagem durassem meses. Pedrosa et al. (2013) em seus estudos sobre os parâmetros da compostagem, monitoravam a temperatura uma vez ao dia.

Coletar dados com pequeno intervalo de tempo com auxílio da automação de dados permitem um melhor monitoramento e entendimento do processo. Além da redução do tempo e mão de obra para se realizar a medição, a alta frequência de coleta permite uma melhor visualização do perfil de variação diária de temperatura e permite observar com facilidade as respostas das leiras às ações realizadas (TAIATELE et al., 2015).

3.2.3 Umidade

A umidade da leira depende das condições do resíduo utilizado, da granulometria e da fase de degradação em que o processo de compostagem se encontra (MASSUKADO, 2008). Segundo Fernandes e Silva (1999) o teor de umidade ótimo para o sistema é entre 55 e 60%.

Teores elevados de umidade, superiores a 65%, podem ser facilmente percebidos, pois há exalação de odores e levam a leira a condições de anaerobiose, uma vez que a água irá ocupar os espaços vazios, impedindo a passagem de oxigênio. Além disso, haverá produção de chorume. Baixos teores de umidade, inferior a 45%, podem levar à paralisação do processo, uma vez que inibe a atividade microbiana (PEREIRA NETO, 1996; HERBETS et al., 2005).

Para corrigir a umidade da leira, o momento ideal é ao fazer o revolvimento, pois será possível homogeneizar a umidade do material. Em situações onde a umidade é muito baixa, basta adicionar água para que a água seja distribuída de maneira uniforme (MASSUKADO, 2008).

A Instrução Normativa nº 25 publicada em 2009 pelo Ministério da Pecuária, Agricultura e Abastecimento – MAPA - propõe que o valor máximo para umidade em fertilizantes orgânicos oriundos de resíduos domiciliares – classificado na norma como “Classe C” - seja de 50% (MAPA, 2009).

3.2.4 Relação C/N

Segundo Herbets et al. (2005) a degradação microbiológica depende também da eficiência em que os microrganismos metabolizam os nutrientes.

Segundo Kiehl (2004) 2/3 do carbono é utilizado como fonte de energia para a oxidação da matéria orgânica e 1/3 é utilizado como biomassa, já o nitrogênio é usado no crescimento dos microrganismos.

A demanda de carbono é maior que a demanda por nitrogênio, porém é necessário estabelecer uma proporção entre os dois nutrientes para que não haja um excesso de carbono sobre o nitrogênio. Em compostagem pobre em nitrogênio, a atividade microbiana diminui, além de propiciar condições ácidas por causa da nitrificação. Quando há excesso de nitrogênio, o sistema busca o equilíbrio, eliminando nitrogênio pela volatilização da amônia, causando assim um forte odor (PEREIRA NETO, 1996).

Encontrar a proporção adequada aumenta as chances de sucesso da compostagem, pois os microrganismos somente degradam o carbono se houver nitrogênio para seu crescimento (MASSUKADO, 2008). Segundo Kiehl (2004) a proporção ótima deve ser 30/1, ou seja, a cada 30 partes de carbono é necessária uma de nitrogênio. Mas variações entre 26/1 e 35/1 são consideradas aceitáveis. Fernandes e Silva (1999) assumem variações entre 20/1 a 70/1 dependendo da biodegradabilidade do produto. No final da compostagem, a relação C/N converge para um valor próximo a 10/1, devido à mineralização do carbono orgânico.

Pedrosa et al. (2013) realizaram a compostagem de resíduos orgânicos domiciliares e poda de árvores e a relação C/N inicial foi de 28:1. No final do processo a relação encontrada foi de 6:1. Marques et al. (2016) e Demetrio et al. (2016) utilizaram uma relação C/N inicial um pouco menor: 17,69:1 e 13:1, respectivamente para a compostagem de resíduos orgânicos e poda de árvore. Ao final do processo a relação C/N era próxima a 10:1.

A Instrução Normativa nº 25/2009 do MAPA propõe que o valor máximo da relação C/N final para fertilizantes oriundos de resíduo domiciliar seja de 20:1 (MAPA, 2009).

A Resolução CONAMA nº 481, de 3 de outubro de 2017 estabelece que em processos de compostagem de alto impacto ambiental e aqueles onde o composto final será comercializado, as relações carbono/nitrogênio do composto final devem ser menores que 20:1 (BRASIL, 2017).

3.2.5 Granulometria

A granulometria, ou tamanho das partículas, também é um fator que influencia no processo de compostagem. Quanto maior for a superfície de contato do material a ser compostado, maior será a decomposição microbiológica da matéria orgânica acelerando o processo de decomposição (KIEHL, 1985; FERNANDES e SILVA, 1999; VALENTE et al., 2009).

Presume-se que quanto mais finas forem as partículas, mais eficiente será o processo. Porém, Herbets et al. (2005) afirmam que se as partículas forem muito finas, haverá condições de compactação e, conseqüentemente, anaerobiose. Assim, o tamanho ideal das partículas deve variar entre 25 e 75 mm, para que possa ter uma porosidade de aproximadamente 35% (FERNANDES e SILVA, 1999).

Misturar vários tipos de resíduos é a maneira mais fácil de balancear a relação C/N e a granulometria, pois além de fornecer os nutrientes necessários para a decomposição, facilitará a homogeneização dos compostos, obtendo a melhor porosidade sem compactação (VALENTE et al., 2009).

Como os resíduos sólidos domiciliares têm tamanhos maiores que os recomendados pela literatura, sugere-se que sejam triturados antes de serem incorporados à leira. Muitas vezes essa trituração é inviável pela umidade do material ou pela falta de equipamentos adequados. A alternativa é fazer uma pré-compostagem de algumas semanas até que o material fique seco o suficiente para triturar (MASSUKADO, 2008).

3.2.6 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Durante o processo de compostagem, o pH pode variar entre 3 a 11, uma vez que muitos microrganismos podem se desenvolver em várias faixas de pH. Mas muitos autores afirmam que a faixa ótima é de 6 a 7,5 (FERNANDES e SILVA, 1999; HERBET et al., 2005; MASSUKADO, 2008).

No início do processo o pH fica levemente mais ácido por razão da produção de ácidos orgânicos (VALENTE et al., 2008). Alguns dias depois, durante a fase termofílica, o pH volta a ficar mais alcalino (entre 7,5 e 9) em razão da hidrólise das

proteínas e da liberação da amônia (FERNANDES e SILVA, 1999). Durante a fase de maturação, o pH é estabilizado próximo a 7 (SCHALCH et al., 2015).

O pH afeta a atividade microbiana e o tipo de microrganismos presentes no processo. Se a mistura atingir o pH de aproximadamente 5 ou inferior, reduz o crescimento de bactérias e actinomicetos termófilos. Além disso, o processo pode ser mais lento para atingir a fase termofílica. Valores muito altos podem provocar deficiência de fósforo e micronutrientes e perda de nitrogênio por volatilização. Porém, se a relação C/N estiver correta, o pH não será um fator crítico durante o processo de compostagem (FERNANDES e SILVA 1999; GOMES, 2001; SCHALCH et al., 2015).

Segundo Gomes (2001) a maioria das bactérias têm preferência por pH neutros, ou seja, entre 6 e 7,5. Fungos têm melhor desenvolvimento em pH levemente ácido, porém toleram uma larga faixa de pH.

A Instrução Normativa nº 25/2009 do MAPA propõe que para comércio de fertilizantes oriundos de resíduo domiciliar o pH seja de no mínimo 6,5 (MAPA, 2009).

Demetrio et al. (2016), em seu trabalho com compostagem de podas de árvores e resíduos orgânicos, obtiveram nos primeiros dias de compostagem valores de pH próximos a 8,5 e, a partir do 28º dia até o fim do processo valores mais neutros, próximos a 7,5. Marques et al. (2016) obtiveram na segunda semana de compostagem de podas de árvore e resíduos orgânicos valores de pH próximos a 8; na quarta semana esses valores já eram próximos de 9 e ao fim da compostagem, 8,7.

3.2.7 Microrganismos

Segundo Gomes (2001) a compostagem é um processo dinâmico, onde há intensa atividade de fungos e bactérias associada à grande sucessão de populações e habitats, resultado de uma modificação contínua de temperatura e substrato. Os principais microrganismos responsáveis por esse processo são bactérias, actinomicetos e fungos (KIEHL, 2004).

As populações biológicas determinam a velocidade do processo de compostagem e a qualidade final do composto. E sua atividade depende dos nutrientes disponíveis e das condições químicas e físicas (GOMES, 2001).

A principal função das bactérias durante a compostagem é degradar açúcares, amidos, proteínas e outros compostos orgânicos de fácil degradação, e atuam principalmente na fase termofílica. Os fungos e actinomicetos são responsáveis pela decomposição de materiais celulósicos (MASSUKADO, 2008).

Logo após a montagem da pilha, o processo de degradação biológica da matéria orgânica é iniciado: compostos simples como açúcar são decompostos por bactérias e fungos mesófilos, liberando assim o calor. Após a elevação da temperatura, esses microrganismos dão lugar a fungos e bactérias termofílicas. Nesta fase ocorre a decomposição da celulose e da lignina. Logo após, há um processo de resfriamento da leira, dando início a uma recolonização do material. Nessa fase há baixa presença de bactérias e grandes populações de fungos e actinomicetos. Na fase de maturação, os compostos orgânicos são lentamente degradados por esses microrganismos (HERBETS et al., 2005).

3.3 BIOPOLÍMEROS

Desde a antiguidade, o homem utiliza embalagens para carregar seus alimentos. Com o aumento da população e da industrialização, aumentou-se a quantidade de embalagens utilizadas e descartadas como resíduo e estas se acumulam em aterros e lixões, causando grandes danos ambientais. Os plásticos contribuem significativamente com esse problema, pois são resistentes e necessitam de um longo tempo para degradação (BRITO et al., 2011).

Os plásticos podem ser classificados em termoplásticos e os termofixos. Os termoplásticos são aqueles que podem ser moldados por ação da temperatura e pressão, tornando-se assim recicláveis. Os termofixos sofrem reações químicas em sua moldagem que impedem sua reciclagem (MORASSI, 2013). No Quadro 1 estão descritos os principais tipos de termoplásticos e suas aplicações.

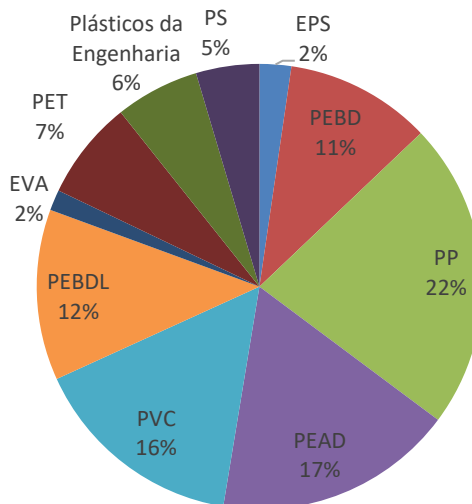
Quadro 1 - Principais tipos de termoplásticos

Nome	Sigla	Aplicação
Polietileno Tereftalato	PET	Embalagens, carpetes e etc.
Policloreto de Vinila	PVC	Tubos, isolamento de cabos elétricos, filmes de revestimento.
Polietileno	PE	Filmes para embalagens, artigos domésticos.
Polipropileno	PP	Filmes para embalagens, artigos domésticos, indústria automobilística.

Fonte: Adaptado de Morassi (2013).

Levantamentos feitos em grandes cidades brasileiras apontam que os tipos de plásticos mais consumidos no Brasil são os polietilenos de alta e os prolipilenos (ABIPLAST, 2016) como descrito na Figura 4.

Figura 4 - Plásticos mais consumidos no Brasil



Fonte: Adaptado de ABIPLAST (2016).

Nota: PP – Prolipileno, PEAD – Polietileno de alta densidade, PEBD – Polietileno de baixa densidade, PEBDL – Polietileno de baixa densidade linear, PVC – Policloreto de vinila, PET – Polietileno tereftalato, PS – Poliestireno, EVA – Espuma vinílica acetinada, EPS – Poliestireno expandido.

Diante desse problema, vários estudos estão sendo realizados na busca pelo desenvolvimento de embalagens mais sustentáveis (DEBIAGI, 2013). É o caso da produção e utilização de polímeros biodegradáveis, polímeros verdes, polímeros oxibiodegradáveis e dos biopolímeros.

Segundo Ivano (2013) os polímeros biodegradáveis são polímeros cuja degradação é feita por microrganismos. Podem ser classificados de acordo com o seu material de origem: (1) origem agrícola (fontes renováveis como amido e celulose); (2) origem microbiana (obtidos por meio da fermentação de substratos agrícolas); (3) produtos de origem biotecnológica (polímeros que envolvem a produção biotecnológica/fermentação, porém é necessário um processo de síntese ou polimerização convencional); (4) derivados da indústria petroquímica (policprolactonas, poliésteraminas, copoliésteres alifáticos e os copoliésteres aromáticos).

Os polímeros verdes são os polímeros que em sua produção e degradação causam menor impacto ambiental se comparados aos polímeros convencionais.

Podem ser considerados também aqueles polímeros que antes eram feitos de fontes fósseis, mas por causa dos avanços tecnológicos podem ser produzidos utilizando fontes renováveis, porém não são necessariamente biodegradáveis (BRITO et al., 2011).

Os polímeros oxibiodegradáveis são plásticos que contêm aditivos que aceleram sua degradação oxidativa com a presença da luz solar e calor. Um material que levaria aproximadamente 400 anos para degradar, se degradaria em apenas 18 meses. Pesquisadores afirmam que ao se degradar, os polímeros não desintegram e sim se fragmentam podendo assim contaminar o solo e os lençóis freáticos (BRITO et al., 2011).

Os polímeros biodegradáveis de origem agrícola são também chamados de biopolímeros e são aqueles cujas características mais contribuem para a sustentabilidade (NOGUEIRA, 2013). Segundo a Norma Brasileira NBR 15448 – 2 (ABNT, 2008), biopolímeros são “polímeros ou copolímeros produzidos por meio de matérias-primas de fontes renováveis, como: cana de açúcar, milho, celulose e outras”.

As principais vantagens dos biopolímeros são: as fontes renováveis possuem um ciclo de vida menor se comparado às fontes não renováveis; diminuição dos impactos da retirada e refino de petróleo e grande potencial de substituição dos polímeros (BRITO et al., 2011).

A principal desvantagem dos biopolímeros é que seu mercado no Brasil ainda é pequeno. O preço ainda é o fator mais determinante, uma vez que é alto comparado ao polímero comum. Porém, segundo Borschiver et al. (2008), tem taxa de crescimento de 20% ao ano. Em 2002, foram produzidas 60.000 toneladas de biopolímeros com preço de comercialização de US\$ 4/kg; para 2015 a previsão era de uma produção de 1.000.000 t/ ano, com um preço de US\$ 2/kg, ainda 50% mais caro que o PP, PE e PET.

Segundo Pedrosa et al. (2016) o *poli(ácido láctico)*, ou PLA, é um polímero biodegradável, compostável, e é obtido a partir de recursos renováveis como milho e açúcar da beterraba. Esse poliéster apresenta baixa resistência térmica, baixa temperatura de distorção térmica e atrativas propriedades mecânicas, tornando-se, assim, um dos biopolímeros mais importante para a indústria.

O amido é o material mais versátil para ser usado na produção de biopolímeros. É estudado desde os anos 70 por causa do seu baixo custo e

capacidade de se misturar a outros polímeros. Pode ser utilizado na produção de embalagens e itens de descarte rápido, além da confecção de espumas (expandidos), filmes, sacolas, itens moldados, produtos termoformados e também em itens de higiene pessoal (BORSCHIVER et al., 2008; BRITO et al., 2011).

Apesar disso, a desvantagem do uso desse material é a sua fragilidade e sua baixa resistência à umidade, necessitando assim de plastificantes ou a adição de fibras vegetais, como a casca de aveia, para que se tornem mais resistentes à tração e à água e sejam mais flexíveis quanto às embalagens convencionais (SALGADO et al., 2008; DEBIAGI et al., 2010).

As fibras vegetais são compostas por celulose, hemicelulose e lignina. Este último insolúvel em água, e uma pequena quantidade de ceras e ácidos graxos. Essas fibras podem ocorrer na natureza, ser cultivadas como atividade agrícola ou resíduos da agroindústria. Essa adição de resíduos lignocelulósicos além de melhorar as propriedades físicas e químicas das embalagens de amido, diminuem seus custos (DEBIAGI et al., 2013).

No Brasil, há vários grupos de pesquisa que investigam biopolímeros, com destaque ao grupo de pesquisa Biotecnologia e Glicoconjugados do Departamento de Bioquímica e Biotecnologia da Universidade Estadual de Londrina, que desenvolve e avalia as propriedades dos mais variados tipos de biopolímeros (IVANO, 2013; DEBIAGI, 2013; MARENGO et al., 2013; NASCIMENTO et al., 2016; SHIRAI et al., 2016; SOUZA et al., 2016; SUEIRO et al., 2016; OLIVATO et al., 2017).

Alguns biopolímeros apresentam grande potencial para substituição de polímeros provenientes de fontes fósseis. Essa possibilidade de substituição é apresentada na Quadro 2.

Quadro 2 - Potencial de substituição de alguns polímeros

Polímero	PVC	PEAD	PEBD	PP	PS	PET
Amido	-	+	+	+	+	-
PLA	-	+	-	+	+	+
PHB	-	+	-	++	+	-
PHBHx	+	++	++	++	+	+

Fonte: Brito et al. (2011).

Nota₁: ++ Substituição Completa, + Substituição Parcial, - Não Substitui.

Nota₂: PVC – Policloreto de vinila, PEAD – Polietileno de alta densidade, PEBD – Polietileno de baixa densidade, PP – Polipropileno, PS – Poliestireno, PET – Polietileno tereftalato, PLA – Poli (Ácido Lático), PHB – Polihidroxibutirato, PHBHx – Polihidroxibutirato-co-polihidroxihexanoato.

3.4 COMPOSTABILIDADE DE BIOPOLÍMEROS

A diferença entre polímeros biodegradáveis e compostáveis está em algumas características que os compostáveis têm a mais. Além da degradação a dióxido de carbono, água, compostos inorgânicos e biomassa, os polímeros devem cumprir outros critérios como compatibilidade com o processo de compostagem, não ter efeito negativo na qualidade do composto e apresentar taxa de degradação compatível com outros materiais da compostagem (RUDNIK, 2013).

A Associação Brasileira de Polímeros Biodegradáveis e Compostáveis define polímeros biodegradáveis e compostáveis como:

Polímeros biodegradáveis e compostáveis são polímeros a base de fontes renováveis (amidos a partir de batata, milho, mandioca e etc) e/ou fontes fósseis (petróleo) que por ação de microrganismos como bactérias, fungos e consomem totalmente o material como alimento transformando-o em água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), energia e biomassa (ABICOM, 2009, p.3).

Existem várias normas e organismos regulamentadores sobre a compostagem de polímeros fornecendo procedimentos obrigatórios para a qualidade do composto (ABICOM, 2009):

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 15448–1 (2006) e 15448–2 (2008);
- American Society for Testing and Materials - ASTM D6400 (2004);
- European Standardization Committee - EN13432 (2000), EN 14045 (2003);
- Standards Australia – AS ISO14855. (2005)

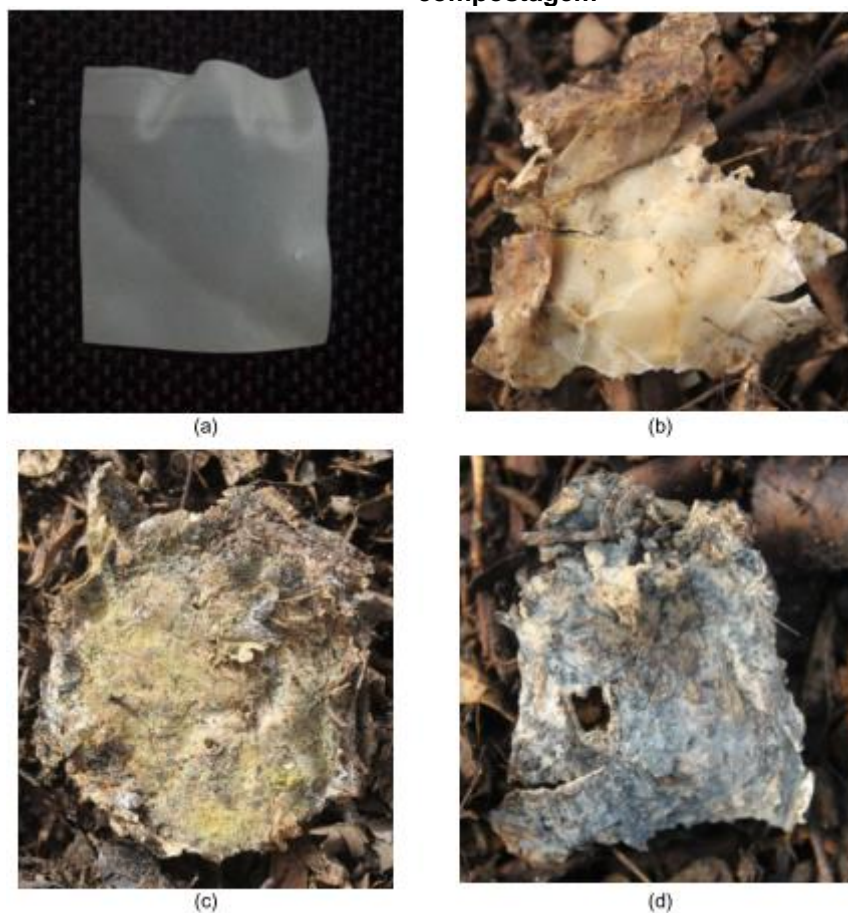
Para obter a certificação de um determinado material como “compostável”, normalmente é necessário atender quatro etapas (ABICOM, 2009):

- Caracterização química do material, ou seja, análise de metais pesados e sólidos voláteis.
- Quantificação da relação entre a quantidade de gás carbônico emitido pelo biopolímero com uma amostra de celulose padrão. Essa relação tem que ser maior que 90%.
- Desintegração do material em mais de 90% em 90 dias.
- Verificação quanto à toxicidade de algum elemento às plantas.

Por meio da compostagem é possível a degradação de biopolímeros que na maioria das vezes estão misturados aos resíduos orgânicos domiciliares, tornando mais eficientes as usinas de compostagem, que muitas das vezes não têm estrutura suficiente para fazer essa separação (NOGUEIRA, 2013).

Alguns estudos vêm sendo realizados para avaliar a compostabilidade de biopolímeros. Taiatele (2014) avaliou a compostabilidade de filmes e bandejas feitas de amido com resíduos orgânicos domiciliares e podas de árvores. O processo durou 42 dias e ao final da compostagem foi constatada boa descaracterização do resíduo. As bandejas de amido degradaram de forma muito rápida, tanto que em seu primeiro revolvimento, quatro dias após a montagem da leira, não foi mais possível observá-las. Na Figura 5 mostra-se diferentes graus de decomposição do filme de PBAT/amido ao longo do processo de compostagem.

Figura 5 - Diferentes estágios de degradação de PBAt/amido durante o processo de compostagem



Nota: a- Filme de PBAT/amido antes do processo de compostagem, b-d – Durante o processo de compostagem.

Fonte: Taiatelli, 2014.

Taiatele (2017) analisou a degradação de filmes produzidos a partir de poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT), ácido polilático (PLA), álcool polivinílico (PVA) e de suas blendas com amido termoplástico (TPS) via compostagem com resíduos orgânicos e podas de árvore e concluiu que a inserção desses polímeros não prejudicou o processo. Além disso, concluiu que as blendas com o TPS degradaram muito mais drasticamente que os polímeros puros.

Kale et al. (2007) testaram e compararam a biodegradabilidade e a compostabilidade de garrafas de água feitas de biopolímero (PLA) sob condições reais de compostagem e em fragmentos das garrafas testados *in vitro*. A leira de compostagem desse trabalho foi feita utilizando esterco de vaca, aparas de madeira, restos de ração das vacas e as garrafas de água. Periodicamente, as garrafas foram tiradas das leiras, para análise da variação do seu peso molecular e

avaliação visual por meio de fotografias. Os autores concluíram que em leiras de compostagem, as garrafas de PLA degradaram mais rápido do que *in vitro*.

Gómez e Michel (2013) compararam a biodegradabilidade relativa de vários polímeros em três tipos de métodos: compostagem, incubação no solo e em condições de digestão anaeróbia. Foram testados em condições simuladas de compostagem três tipos de biopolímeros. A leira de compostagem era formada de esterco de vacas leiteiras e serragem. O material que obteve maior taxa de degradação foi o biopolímero composto por amido. Para plásticos contendo aditivos, não foi observada degradação.

Mohee e Unmar (2007) em seu estudo sobre a biodegradabilidade de plásticos em condições naturais e controladas realizaram o teste de compostabilidade de um plástico que continha aditivo que desintegrava o plástico por oxidação e fotodegradação (PDQ-H) e um biopolímero com um aditivo totalmente degradável (TDPA), esses plásticos foram misturados com galhos e restos alimentares. Os parâmetros monitorados nesse trabalho foram: temperatura, teor de umidade, pH, sólidos voláteis e condutividade elétrica. Ao final do processo, foi possível determinar que o plástico com PDQ-H degradou mais rápido que o plástico com TDPA.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O processo de compostagem teve início dia 20 de abril de 2017 e término no dia 20 de junho de 2017 e foi realizado na Casa de Vegetação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, onde há cobertura e piso impermeável.

A metodologia foi baseada na NBR 15448-2:2008 – “Embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis. Parte 2: Biodegradação e compostagem – Requisitos e métodos de ensaio” (ABNT, 2008).

Nesse experimento, desejou-se simular o tratamento realizado nas usinas de compostagem municipais, onde os resíduos orgânicos chegam acondicionados em sacolas plásticas, são triturados e misturados a poda de árvore, uma vez que a poda de árvore é um resíduo comumente gerado pelos municípios e requer destinação ambientalmente adequada.

4.1 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS E RESÍDUOS

Os biopolímeros utilizados no processo foram disponibilizados pelo Departamento de Bioquímica e Biotecnologia da Universidade Estadual de Londrina (UEL), cuja formulação é apresentada na Tabela 1. Foram utilizados amido de mandioca nativo, poli (ácido lático) (PLA), casca de aveia micronizada (4,64 g 100g⁻¹ de cinzas, 3,95 g 100g⁻¹ de proteína, 2,12 g 100g⁻¹ de lipídio, 23,13 g 100g⁻¹ de celulose, 26,25 g 100g⁻¹ de hemicelulose e 3,80 g 100g⁻¹ de lignina) e glicerol.

Tabela 1 - Formulação dos biopolímeros compostados

Formulação	Amido (g100g ⁻¹)	Glicerol (g100g ⁻¹)	PLA (g100g ⁻¹)	Casca de aveia (g100g ⁻¹)
1	45	15	40	0,0
2	35	15	40	10

A partir da mistura dos componentes o material foi processado em extrusora mono rosca piloto (BGM, modelo EL-25, Brasil), composta por uma rosca de 25 mm de diâmetro (D) e L/D = 30, quatro zonas de aquecimento e matriz com dois orifícios de 2 mm. O perfil de temperatura utilizado foi 90/150/150/140°C, com velocidade do parafuso de 35 rpm. Após o processamento, os materiais foram cortados com 5 cm de comprimento para realização dos testes de compostagem.

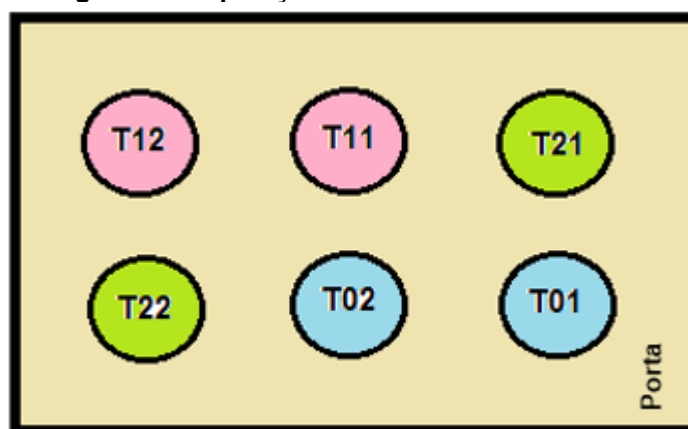
Os resíduos orgânicos foram doados por um restaurante de grande porte da cidade de Londrina e as podas de árvores foram cedidas pela Prefeitura Municipal de Londrina.

4.2 TRATAMENTOS E DIMENSIONAMENTO DOS REATORES

A compostagem foi conduzida em bombonas de cem litros completadas pela mistura de resíduos orgânicos (resíduos de restaurante e poda de árvores), com a adição dos biopolímeros, resultando em três tratamentos.

O tratamento T_0 era a testemunha, pois não continha nenhum tipo de biopolímero. O tratamento T_1 e T_2 eram formados pelo mesmo volume de resíduos orgânicos e podas, porém com a adição dos biopolímeros sem e com adição de casca de aveia, respectivamente. Cada tratamento foi realizado em duplicata, totalizando 6 unidades experimentais. A disposição dos tratamentos na estufa onde o experimento foi conduzido se deu por sorteio (Figura 6).

Figura 6 - Disposição dos tratamentos na estufa



Nota: T01 e T02 são os tratamentos sem nenhum tipo de biopolímeros, T11 e T12 são os tratamentos com biopolímeros sem casca de aveia e T21 e T22 são os tratamentos que contém biopolímeros com casca de aveia.

Cada unidade experimental possuía o volume de 96 litros para o tratamento sem a adição de biopolímeros e 97 litros nos tratamentos em que os biopolímeros foram adicionados.

Para o cálculo da relação C/N inicial foi necessária a caracterização inicial dos resíduos, visando determinar a composição de Nitrogênio total, Carbono orgânico total, Umidade, Sólidos fixos, Sólidos voláteis, Massa específica, pH e Condutividade elétrica. Essas análises foram feitas no Laboratório de Saneamento da UTFPR Câmpus Londrina e os resultados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Características iniciais dos resíduos

Parâmetros	Poda de Árvore	Resíduo Orgânico
Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	620	1296
pH	7,4	4,47
Umidade (%)	42,30	80,08
Massa específica úmida (kg L^{-1})	0,256	0,688
Sólidos totais (%)	57,69	19,92
Sólidos voláteis (%)	91,71	96,16
Sólidos fixos (%)	8,29	3,84
Carbono orgânico total (%)	36,91	38,80
Nitrogênio total (%)	1,91	2,31

O pH e a Condutividade elétrica foram obtidos por meio da metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). A metodologia usada para a série de sólidos e umidade seguiu o estabelecido pela *American Public Health Association* (APHA, 2012). O Nitrogênio total foi determinado pela metodologia proposta por Malavolta et al. (1997). O teor de Carbono orgânico total foi estimado a partir da fórmula proposta por Carmo e Silva (2012) – Equação 1.

$$COT = (0,425 * SV) - 2,064 \quad (1)$$

Onde:

COT = Carbono orgânico total.

SV = Sólidos voláteis.

A partir dos resultados desta caracterização, utilizou-se a fórmula proposta por Kiehl (1985) – Equação 2 - que define as proporções de resíduos a serem utilizadas, de modo a se iniciar o processo com relação C/N adequada.

$$\frac{C}{N} = \frac{(X * Nn) - Cm}{Cc - (X * Nc)} \quad (2)$$

Onde:

X = relação Carbono/Nitrogênio inicial desejada.

Nn = % de Nitrogênio do resíduo rico em Nitrogênio (Resíduo Orgânico).

Cm = % de Carbono do resíduo rico em Nitrogênio (Resíduo Orgânico).

Cc = % de Carbono do resíduo rico em Carbono (Poda de Árvore).

Nc = % de Nitrogênio do resíduo rico em Carbono (Poda de Árvore).

Em seguida, foi realizada a correção da umidade dos resíduos e a conversão de massa a volume a partir da massa específica.

A partir dos resultados da caracterização dos resíduos, notou-se que não seria possível atender a relação C/N de 30:1, preconizada na literatura (KIEHL, 1985) como ideal para o início do processo, pois essa proporção inviabilizaria a montagem dos reatores e a homogeneização dos resíduos. Dessa maneira, outras relações C/N foram analisadas como a de 19:1, 18,5:1 e 18:1 (Tabela 3).

Tabela 3 - Composição dos reatores para diversas relações C/N

Relação C/N	Resíduos Orgânicos		Poda	
	Volume (L)	Volume (%)	Volume (L)	Volume (%)
19:1	11	11,5%	85	88,5%
18,5:1	30	31%	66	69%
18:1	47	49%	49	51%

Escolheu-se, portanto, a relação C/N de 18,5:1, pois a proporção de aproximadamente 1,8 litros de poda para 1 litro de resíduo orgânico foi considerada a mais adequada para a homogeneização dos resíduos. Dessa maneira, os reatores eram compostos de aproximadamente 30 litros de resíduo orgânico e 66 litros de poda de árvore. Além disso, no tratamento T₁ e T₂ foram colocados 400 gramas de biopolímeros.

4.3 PREPARAÇÃO DO MATERIAL E MONTAGEM DAS BOMBONAS

Os resíduos orgânicos já se encontravam na granulometria adequada, uma vez que são restos de alimentos, assim como as podas de árvores, que são trituradas no momento da coleta. Retirou-se as carnes do resíduo de restaurante, manualmente, a fim de evitar odores fortes decorrentes da sua decomposição e a atração de animais e vetores para a estufa.

A montagem dos reatores foi feita por meio da superposição de camadas alternadas de cada resíduo. A primeira e a última camada eram de poda de árvore, já que se tratava de resíduo de estrutura e encobriu os resíduos orgânicos, a fim de evitar o mau cheiro e a proliferação de vetores nas primeiras semanas da compostagem. No tratamento que continha biopolímeros, os mesmos foram incorporados com os resíduos orgânicos na parte interna da bombona. Na Figura 7 apresenta-se um esquema de como os resíduos foram misturados no interior das bombonas.

Figura 7 - Esquemática das camadas das bombonas



Nota: RO – Resíduos orgânicos

Para facilitar a visualização da degradação desses biopolímeros e a sua localização na massa de resíduos, duas amostras foram envoltas em meias de nylon e colocados em cada bombona. A porosidade dessas meias permite que os biopolímeros entrem em contato com os microrganismos e com os outros compostos do processo (TAIATELLI, 2017).

4.4 MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS DA COMPOSTAGEM

Foram monitorados ao longo do processo: temperatura, pH, condutividade elétrica, umidade, sólidos fixos, sólidos voláteis, carbono orgânico total, nitrogênio total, aeração, umidade aparente, reduções de volume e massa. No composto final, analisou-se os teores de macro e micronutrientes. A frequência de análise de cada parâmetro está descrita na Tabela 4.

Tabela 4 - Frequência de monitoramento dos parâmetros da compostagem

Parâmetro	Frequência
Temperatura	A cada 10 minutos
Umidade Aparente	A cada 3 dias
Aeração	A cada 3 dias
pH	Quinzenal
Condutividade elétrica	Quinzenal
Sólidos Totais	Quinzenal
Sólidos Fixos	Quinzenal
Sólidos Voláteis	Quinzenal
Nitrogênio total	Quinzenal
Carbono orgânico total	Quinzenal
Redução de Massa	Final
Redução de Volume	Final
Micro e Macronutrientes	Final

A temperatura foi monitorada com o auxílio de um sistema automatizado de coleta de dados. Cinco sensores foram inseridos em cada reator. Seu posicionamento no interior da bombona se deu em pontos estratégicos, a fim de registrar a temperatura em diferentes pontos e obter as variações de temperatura. Esses sensores foram ligados a uma placa de arduino equipada de um sistema registrador de dados (*data logger*) junto de um sistema de tempo real que fornece a hora, o minuto e o segundo da aquisição de dados. O armazenamento de dados ocorreu a cada 10 minutos e a gravação se deu num um cartão de memória.

A aeração foi realizada por meio de revolvimentos manuais, que aconteceram a cada 3 dias, porém o primeiro revolvimento só foi realizado após 7 dias. A umidade foi controlada por meio do teste da mão (NUNES, 2009) no momento do revolvimento, porém não houve necessidade de adição de água ao longo do processo.

A redução de volume foi medida utilizando um recipiente indeformável de base conhecida. Para calcular a redução de massa, o material foi pesado no início

e no final do processo. Utilizando os dados de umidade, obtidos nas análises em laboratório, foi descontado a massa da água, para que fosse possível comparar as diferenças entre a massa seca inicial e final.

Os compostos finais foram encaminhados ao Laboratório de Agroquímica e Meio Ambiente da Universidade Estadual de Maringá, para que a análise de micro e macronutrientes fosse realizada, a fim de avaliar se o composto atendia a Instrução Normativa nº 25/2009 do MAPA.

4.5 MONITORAMENTO DOS BIOPOLÍMEROS

Para o monitoramento dos biopolímeros foram realizados registros fotográficos e microscopia eletrônica de varredura (MEV) em diferentes estágios do processo a fim de acompanhar a degradação dos biopolímeros.

4.5.1 Registros Fotográficos

No início do processo e ao final da compostagem, foram tiradas fotos dos fragmentos de biopolímeros que estavam dentro das bombonas de modo a se realizar uma comparação visual do aspecto do material.

4.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Ao final do processo de compostagem algumas amostras dos biopolímeros foram enviadas ao Laboratório de Biotecnologia da Universidade Estadual de Londrina, onde foi realizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de superfície e fratura dos materiais para a análise da microestrutura. Foram enviadas também algumas amostras dos biopolímeros antes de serem colocados nos reatores a fim de comparação.

As amostras foram imersas em nitrogênio líquido para congelamento rápido e, posteriormente, foram fraturadas com auxílio de pinças de aço inoxidável. Em seguida essas amostras foram deixadas em dessecador com cloreto de cálcio durante 48 h para que a umidade relativa das mesmas fosse de 0% antes de serem revestidas com ouro, com o auxílio de um Sputter Coater BAL-TECSCD 050. O

microscópio eletrônico de varredura utilizado para a obtenção das micrografias foi o FEI, Quanta 200 (EUA).

Essa análise teve como objetivo verificar mudanças na microestrutura dos biopolímeros, assim como a presença de microrganismos em sua superfície, oriundos do processo de compostagem.

4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A análise da variância dos dados de temperatura média foi feita considerando um delineamento em parcela subdividida. As análises foram feitas por meses, pois quando considerado o período todo, os dados não apresentaram homogeneidade de variâncias.

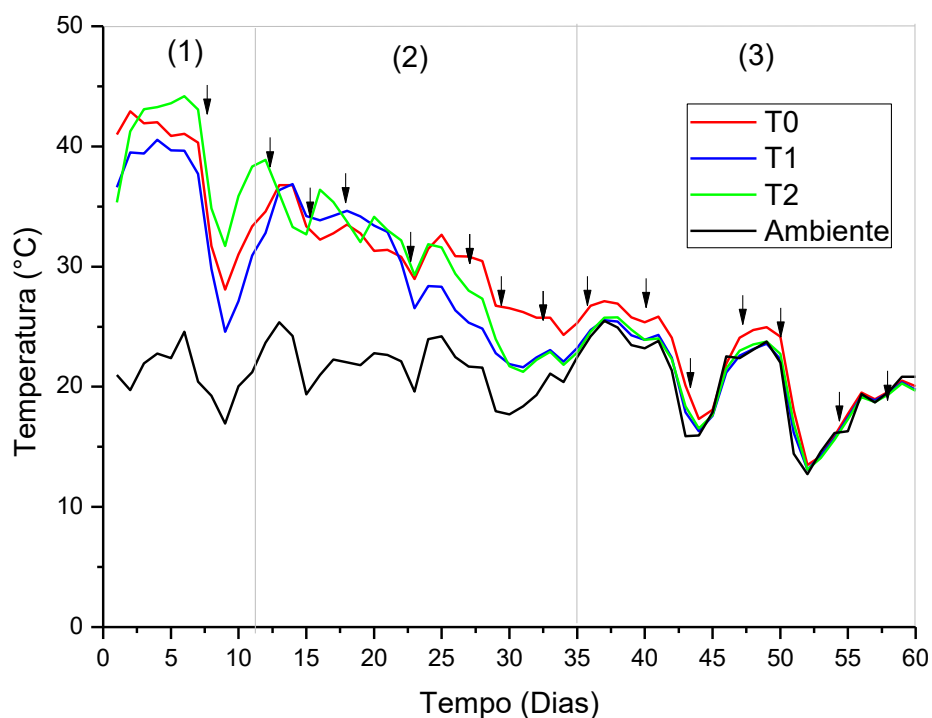
Para os parâmetros relação C/N, Carbono orgânico total, Nitrogênio total, pH, Condutividade elétrica, Série de sólidos e redução de volume foi realizada o teste de Scott-Knott a 5% de significância, de modo a comparar as médias de cada tratamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 TEMPERATURA

O perfil médio da temperatura durante o processo de compostagem nos três tratamentos pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Temperatura média durante o processo de compostagem



Nota₁: T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1– poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia.

Nota₂: (1) Fase Termofílica; (2) Fase Mesofílica; (3) Fase de Maturação

Nota₂: ↓ – Revolvimentos.

Logo no primeiro dia de compostagem já foi possível observar temperatura próximas a 40°C, caracterizando a fase termofílica, como previsto por Barreira (2015) e Kiehl (2004). Essa fase durou aproximadamente 11 dias. Tortora et al. (2012) afirmam que as faixas e temperaturas de crescimento de bactérias não são rigidamente definidas e assumem que os mesófilos, que são a maioria dos organismos patogênicos humanos, têm temperatura de crescimento entre 25° e 40°C.

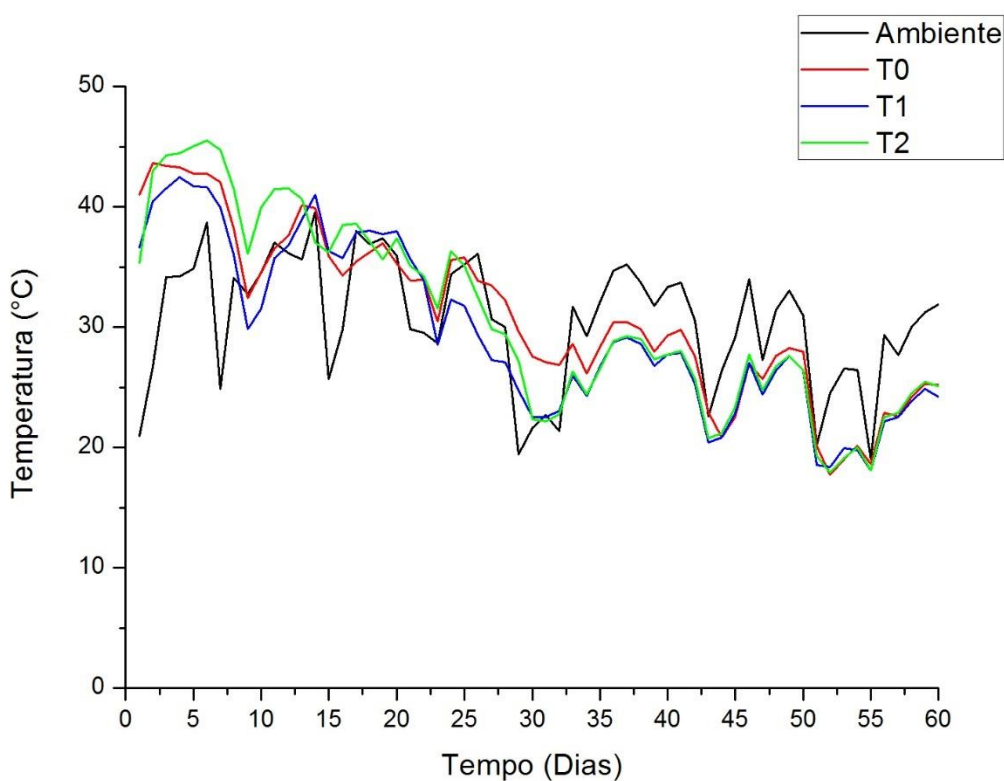
A fase mesofílica teve duração de aproximadamente 24 dias, acabando por volta do 36º dia. Logo em seguida, foi possível ver a fase de maturação, onde as temperaturas dos reatores eram muito próximas à temperatura ambiente.

Pimenta et al. (2016) compostaram resíduos orgânicos de restaurante e podas de árvores, porém em leiras, e logo no primeiro dia de processo, observaram temperaturas próximas a 50°C. A fase termofílica teve duração de aproximadamente 20 dias. Toro (2016) ao compostar resíduo orgânico alimentício com embalagens compostáveis não observou diferença entre os perfis de temperatura dos tratamentos com e sem embalagens compostáveis.

Nota-se na Figura 8 que a temperatura dos reatores acompanhou o comportamento da temperatura ambiente e que sempre após os revolvimentos houve aumento da temperatura média dos reatores. Pereira Neto (1996) cita que o revolvimento ou aeração tem por finalidade suprir a demanda de oxigênio da população microbiana e atua como agente de controle de temperatura. Kiehl (1985) afirma que a abundância de ar acelera a decomposição.

Na Figura 9 estão apresentadas a variação da temperatura máxima durante o processo de compostagem. Destaca-se que a maior temperatura foi no 6º dia de compostagem, no tratamento T2, registrando 46,7°C. A temperatura ambiente teve pico máximo no 12º dia de compostagem, onde a temperatura atingiu 38,7°C.

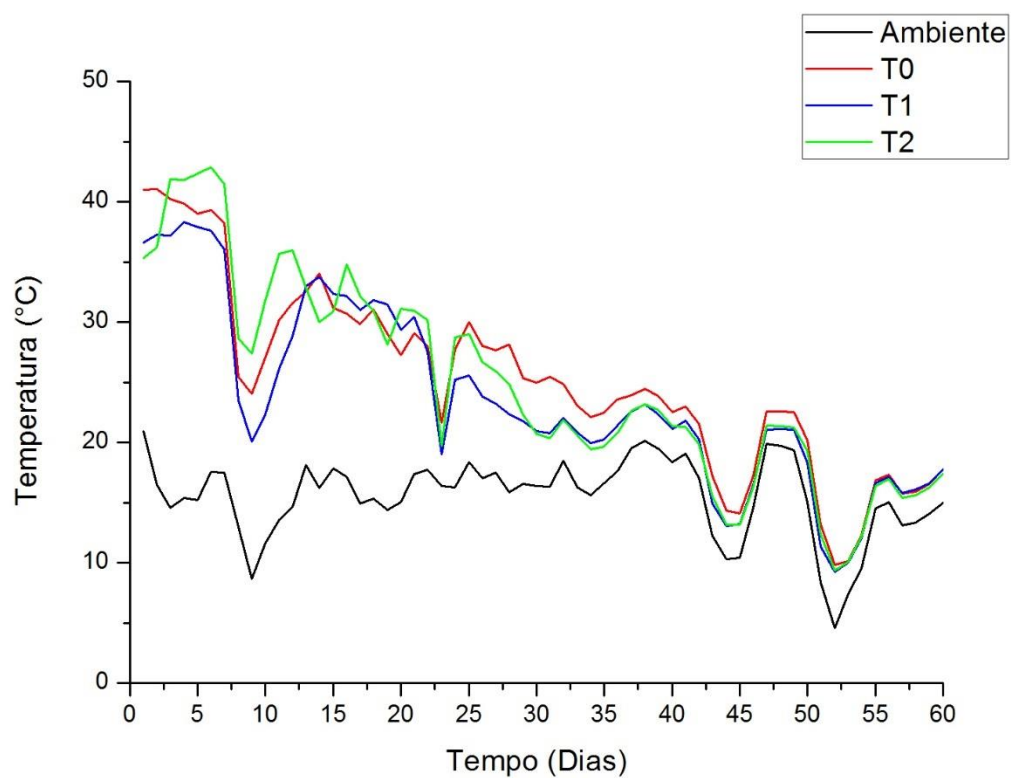
Figura 9 - Variação temperatura máxima ao longo o processo de compostagem



Nota: T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1– poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia.

Demetrio et al. (2016) ao compostarem resíduo orgânico alimentício com podas de árvore obtiveram como temperatura máxima 44°C. Os autores concluíram que isso se deve à pequena escala do sistema, que perde calor para o ambiente mais facilmente que experimentos em grande escala.

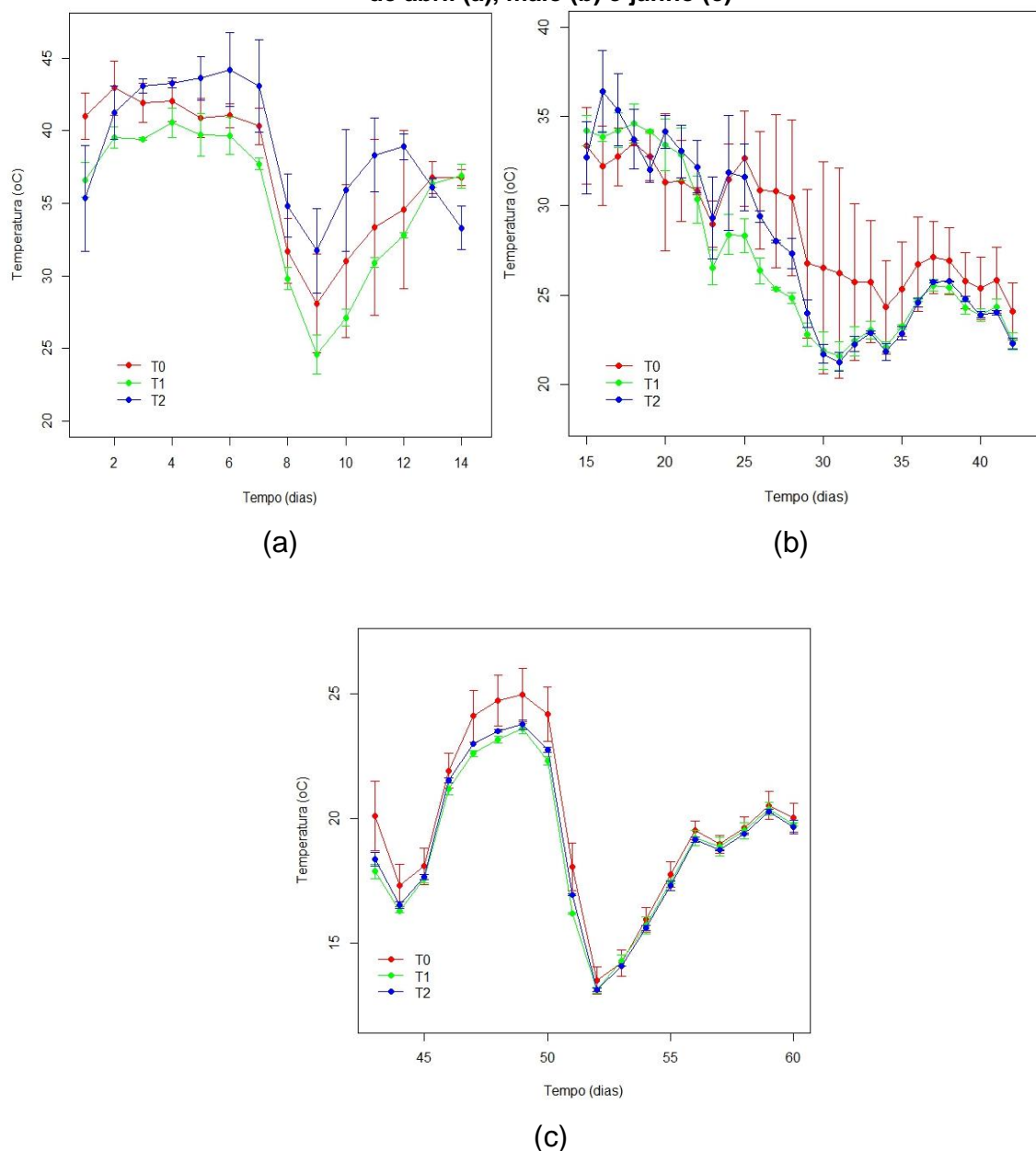
Na Figura 10 apresenta-se a variação da temperatura mínima durante os 60 dias de processo. Destaca-se que a menor temperatura foi no 52º dia de compostagem, no tratamento T2, registrando 9,2°C. Nesse mesmo dia foi observada a menor temperatura ambiente: 4,6°C.

Figura 10 - Perfil da temperatura mínima ao longo o processo de compostagem

Nota: T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1– poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia.

Na Figura 11 observa-se desvio padrão das temperaturas médias dos meses de abril, maio e junho.

Figura 11- Perfil médio com erro padrão da temperatura média (°C) no reator ao longo do mês de abril (a), maio (b) e junho (c)



Nota: T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia.

Nota-se que nos primeiros dias do processo, o desvio padrão das temperaturas médias é maior que no mês de junho, isso decorre da atividade microbiana da fase inicial do processo, que é mais intensa. À medida em que vai passando o tempo, ocorre redução desta variabilidade, ou seja, os dados ficam mais homogêneos.

A análise de variância da temperatura média dos tratamentos no mês de abril foi precedida pelo teste de normalidade (Tabela 5). Nota-se que, ao nível de

significância de 5%, não se rejeita a hipótese de normalidade dos resíduos. Além disso, como ilustra a Figura 12, observa-se que há valores discrepantes, mas que não causam distorção na normalidade dos resíduos e as observações encontram-se próxima à reta. Dessa forma, foi possível fazer a ANOVA (Tabela 6).

Tabela 5 - Teste de Normalidade dos dados do mês de abril

Teste	Estatística	p -valor
Shapiro-Wilk	0,97305	0,08886
Cramer-von Mises	0,092565	0,1399
Anderson-Darling	0,60326	0,1134

Figura 12- Gráficos de normalidade dos resíduos – dados de temperatura referentes ao mês de abril

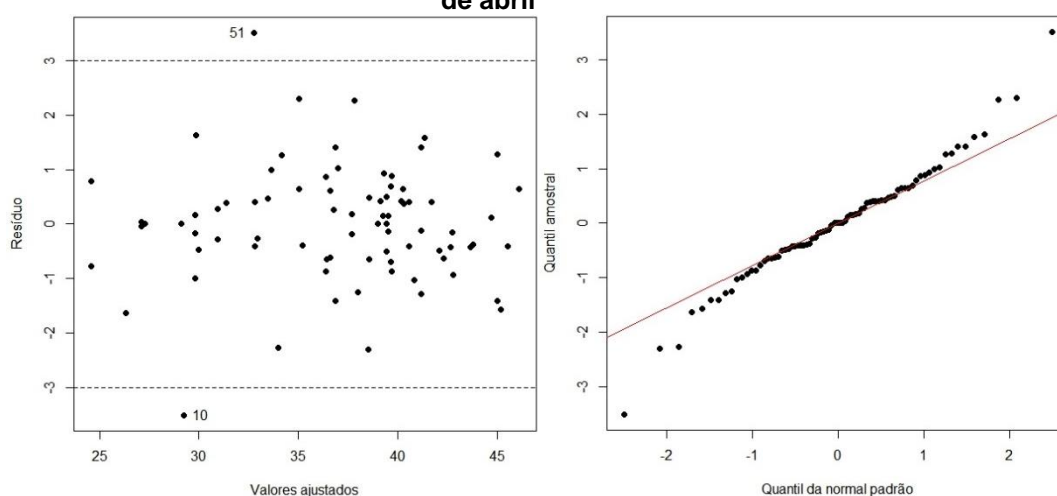


Tabela 6 - Análise de variância mediano mês de abril

Causa de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F_0	p -valor
Tratamento	2	192,39	96,195	1,68812	0,3227259
Resíduo	3	170,95	56,98333		
Tempo	13	1619,32	124,5631	49,24	1,460E-18
Tratamento*Tempo	26	247,51	9,519615	3,763119	0,00016087
Resíduo	35	88,54	2,529714		
Total	79		---	---	---

Observa-se na Tabela 6 que há evidências do efeito de interação entre o tempo e o tratamento. Dessa forma, utilizou o desdobramento do efeito do tratamento dentro dos níveis do tempo e vice-versa. Na Tabela 7 é apresentada a ANOVA do tempo dentro dos níveis do tratamento. Por meio dos resultados, observa-se que existe efeito do tempo fixando o tratamento. Dessa forma, nas

Tabelas 8, 9,10 são apresentados os resultados do teste de Scott-Knott para os tratamentos T0, T1 e T2 no mês de abril.

Tabela 7 - Análise de variância do tempo dentro dos níveis de tratamento no mês de abril

Causa de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F_0	p -valor
T0	13	2493,40310	191,8002	75,81744	0
T1	13	696,32809	53,5637	21,1734	0
T2	13	1712,00901	131,693	52,05743	0

Tabela 8-Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T0 para o mês de abril

Grupo	Tempo	Temperatura Média (°C)
a	2	42,92879
a	4	42,02078
a	3	41,91424
a	6	41,04265
a	1	41,00000
a	5	40,87762
a	7	40,30972
b	13	36,78500
b	14	36,77902
c	8	31,71124
c	10	31,00314
d	12	29,09902
d	9	28,09410
d	11	27,27847

Nota: Letras diferentes representam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

No Tratamento T0 (Tabela 8), do primeiro ao sétimo dia foram observadas as maiores temperaturas, que foram estatisticamente iguais entre si. Em seguida, as temperaturas intermediárias desta fase foram observadas no 13º e 14º dia, uma vez que no 13º dia foi realizado um revolvimento. Na sequência são as temperaturas do 8º e 10º dia e, por fim, as menores temperaturas do período foram obtidas no 9º, 12º e 11º dia de compostagem.

Tabela 9-Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T1 no mês de abril

Grupo	Tempo	Temperatura Média (°C)
a	4	40,54507
a	5	39,68321

a	6	39,65315
a	2	39,50682
a	3	39,41460
b	7	37,70070
b	14	36,86154
b	1	36,60000
b	13	36,37000
c	12	32,78872
c	11	30,92222
c	8	29,80426
d	10	27,12622
d	9	24,58368

Nota₁: Letras diferentes representam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

Para o Tratamento 1 (Tabela 9), do segundo ao sexto dia foram observadas as maiores temperaturas, que foram estatisticamente iguais entre si. Em seguida, as temperaturas intermediárias iguais desta fase foram no 1º, 7º, 13º e 14º. Na sequência são as temperaturas do 8º, 11º e 12º que são estatisticamente iguais, e por fim as menores temperaturas do período foram observadas no 9º e 10º dia de compostagem.

Tabela 10- Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T2 no mês de abril

Grupo	Tempo	Temperatura Média (°C)
a	6	44,18462
a	5	43,60560

a	4	43,25845
a	3	43,08431
a	7	43,07673
b	2	39,41515
b	1	39,00000
b	12	38,88922
b	11	38,32847
c	13	36,08312
c	10	35,88217
c	8	34,83799
c	14	33,30490
c	9	31,72500

Nota: Letras diferentes representam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

No Tratamento T2 (Tabela 10), as maiores temperaturas foram registradas entre o 3º e 7º dia de compostagem, que foram estaticamente iguais entre si. As temperaturas intermediárias do processo ocorreram no 1º, 2º, 11º, 12º dias e as menores temperaturas ocorreram nos dias 8, 9, 10, 13 e 14.

A análise de variância da temperatura média dos tratamentos no mês de maio foi precedida pelo teste de normalidade (Tabela 11). Nota-se que, ao nível de significância de 5%, não se rejeita a hipótese de normalidade dos resíduos. Além disso, como ilustra a Figura 13, observa-se que há valores discrepantes, mas que não causam distorção na normalidade dos resíduos e as observações encontram-se próxima à reta. Dessa forma, foi possível fazer a ANOVA (Tabela 12).

Tabela 11 - Teste de normalidade no mês de maio

Teste	Estatística	p -valor
Shapiro-Wilk	0,98869	0,242
Cramer-von Mises	0,083189	0,1869
Anderson-Darling	0,55713	0,148

Figura 13- Gráficos de normalidade dos resíduos – dados de temperatura referentes ao mês de maio

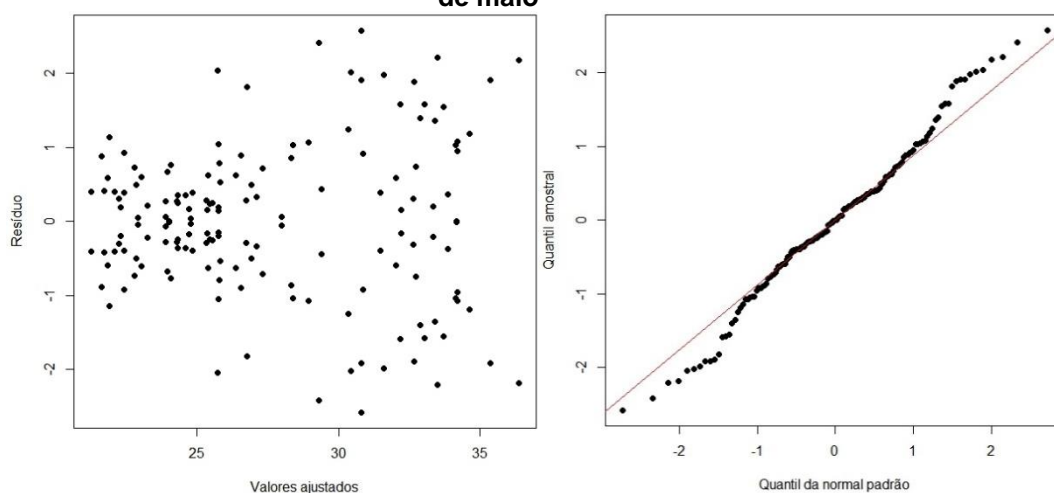


Tabela 12 - Análise de variância da temperatura média no mês de maio

Causa de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F_0	p -valor
Tratamento	2	67,08	33,54	0,39041	0,7068111
Resíduo	3	257,73	85,91		
Tempo	27	2642,7	97,87778	44,2219	8,631E-36
Tratamento*Tempo	48	151,1	3,147917	1,4222	0,0845455
Resíduo	75	166	2,213333		
Total	155		---	---	---

Observa-se na Tabela 12 que não há evidências do efeito de interação entre o tempo e o tratamento. Entretanto, há efeito do tempo sobre a temperatura. Dessa forma, na Tabela 13 são apresentados os resultados do teste de Scott-Knott no mês de maio.

Tabela 13 – Comparação múltipla do tempo na temperatura no mês de maio

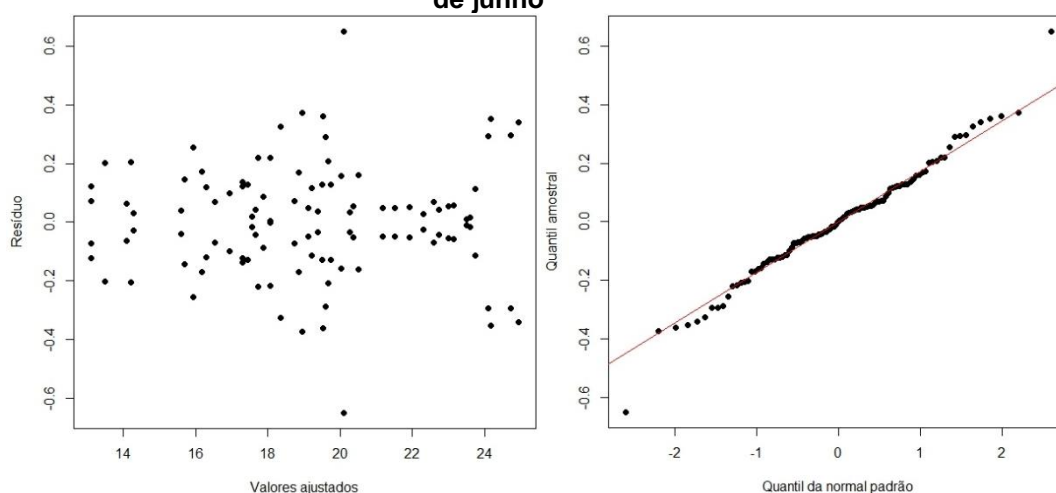
Grupo	Tempo	Temperatura média
a	16	34,16250
a	17	34,11352
a	18	33,95336
a	20	33,78444
a	15	33,41944
a	19	33,09891
a	21	32,96129
b	22	31,11886
b	25	30,85278
c	24	29,93003
c	26	28,87844
d	23	28,26453
d	27	28,05544
d	28	27,54021
e	37	26,13286
e	38	26,03322
e	36	25,34090
f	39	24,94352
f	41	24,72191
f	29	24,50206
f	40	24,38490
f	33	23,89498
f	35	23,79780
f	32	23,46667
g	42	22,93100
g	34	22,74126
g	30	21,80018
g	31	21,42864

O mês de maio foi caracterizado pela fase mesofílica e início da fase de maturação, ou seja, o resfriamento dos reatores.

A análise de variância da temperatura média dos tratamentos no mês de junho foi precedida pelo teste de normalidade (Tabela 14). Nota-se que, ao nível de significância de 5%, não se rejeita a hipótese de normalidade dos resíduos. Além disso, como ilustra a Figura 14, observa-se que há valores discrepantes, mas que não causam distorção na normalidade dos resíduos e as observações encontram-se próxima à reta. Dessa forma, foi possível fazer a ANOVA (Tabela 15).

Tabela 14 - Teste de normalidade no mês de junho

Teste	Estatística	p-valor
Shapiro-Wilk	0,98246	0,1664
Cramer-von Mises	0,07900	0,2112
Anderson-Darling	0,48107	0,2278

Figura 14- Gráficos de normalidade dos resíduos – dados de temperatura referentes ao mês de junho**Tabela 15 - Análise de variância da temperatura média no mês de junho**

Causa de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F_0	p-valor
Tratamento	2	13,43	6,715	0,9561	0,4772744
Resíduo	3	21,07	7,0233333	---	---
Tempo	17	1032,5	60,735294	815,132	5,937E-56
Tratamento*Tempo	34	9,9	0,2911765	3,90789	5,886E-06
Resíduo	51	3,8	0,0745098	---	---
Total	107		---	---	---

Observa-se na Tabela 15 que há evidências do efeito de interação entre o tempo e o tratamento. Dessa forma, utilizou o desdobramento do efeito do tratamento dentro dos níveis do tempo e vice-versa. Na Tabela 16 é apresentada a ANOVA do tempo dentro dos níveis do tratamento. Por meio dos resultados, observa-se que existe efeito do tempo fixando o tratamento. Dessa forma, nas Tabelas 17, 18 e 19 são apresentados os resultados do teste de Scott-Knott para os tratamentos T0, T1 e T2 no mês de abril.

Tabela 16- Análise de variância do tempo dentro dos níveis do tratamento no mês de junho

Causa de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F_0	p -valor
T0	17	392,0632	23,06254	305,7273	0
T1	17	315,7712	18,57477	246,2355	0
T2	17	334,5872	19,6816	260,9081	0

Tabela 17 - Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T0 para o mês de junho

Grupo	Tempo	Temperatura Média
a	49	24,94375
a	48	24,71259
b	50	24,18007
b	47	24,08993
c	46	21,90694
d	59	20,51632
d	43	20,09488
d	60	20,03721
e	58	19,60664
e	56	19,51862
f	57	18,95625
g	45	18,07273
g	51	18,06562
g	55	17,73854
h	44	17,30874
i	54	15,92820
j	53	14,20451
k	52	13,50035

Nota: Letras diferentes diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

Para o Tratamento T0 (Tabela 17) não se notou uma tendência de comportamento das temperaturas no mês de junho. Isso se deve ao fato de que nesse momento do processo o composto encontra-se na fase de maturação e suas temperaturas são muito próximas à temperatura ambiente, fazendo com que as temperaturas dos reatores acompanhem o comportamento da temperatura ambiente. Nota-se que as maiores temperaturas do tratamento ocorreram nos dias 48 e 49, nesses mesmos dias foram os dias com as maiores temperaturas ambientes do mês.

Tabela 18- Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T1 no mês de junho

Grupo	Tempo	Temperatura Média
a	49	23,58924
a	48	23,14965
b	47	22,59201
b	50	22,29091
c	46	21,18229
d	59	20,36979
e	60	19,74186
e	58	19,49790
f	56	19,20793
f	57	18,86181
g	43	17,86811
g	45	17,57273
g	55	17,43160
h	44	16,29161
h	51	16,17049
h	54	15,69662
i	53	14,29097
j	52	13,10979

Nota: Letras diferentes representam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

O mesmo ocorre para o Tratamento T1 e o T2 (Tabela 18 e Tabela 19). O dia com a temperatura ambiente mais baixa ocorreu no dia 52º dia de compostagem, mesmo dia onde ocorreu a menor temperatura de todos os tratamentos.

Tabela 19- Comparação múltipla pelo teste de Scott-Knott do tempo no tratamento T2 no mês de junho

Grupo	Tempo	Temperatura Média
a	49	23,74861
a	48	23,50839
b	47	22,99236
b	50	22,73706
c	46	21,51215
d	59	20,27500
e	60	19,65872
e	58	19,37832
e	56	19,12931
f	57	18,72361
f	43	18,35945
g	45	17,64825
g	55	17,28854
h	51	16,93472
h	44	16,52587
i	54	15,60752
j	53	14,08056
k	52	13,11119

Nota: Letras diferentes representam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

5.2 ANÁLISES FÍSICOS-QUÍMICAS

5.2.1 Carbono Orgânico Total, Nitrogênio Total e Relação C/N

Na Tabela 20 estão descritos os teores de Carbono orgânico total, Nitrogênio total e a relação C/N inicial da poda de árvore e dos resíduos orgânicos e dos tratamentos T0, T1 e T2 depois de 32 dias, 46 dias e 60 dias do início da compostagem.

Tabela 20 - Teores de Carbono orgânico total, Nitrogênio total e relação C/N inicial dos resíduos após 32, 46 e 60 dias de compostagem dos tratamentos

Período	Tratamento	COT(%)	NT(%)	C/N
Inicial	Poda	36,91±0,63	1,91±0,04	19,28±0,63
	RO	38,80±3,71	2,79±0,83	14,61±3,71
	T0	-	-	14,96±0,23a
	T1	-	-	15,04±0,31a
	T2	-	-	15,13±0,50a
32 dias	T0	39,00±5,10a	3,29±0,23a	8,77±0,94a
	T1	32,90±1,13a	3,35±0,68a	10,06±2,37a
	T2	33,53±0,68a	3,66±0,68a	9,32±1,55a
46 dias	T0	30,40±2,96a	3,96±0,91a	7,79±1,06a
	T1	31,25±0,16a	3,17±0,50a	9,99±1,60a
	T2	31,86±0,08a	3,73±1,05a	8,88±2,47a
60 dias	T0	25,88±8,11a	3,50±0,76a	7,32±0,76a
	T1	30,62±1,14a	3,12±0,37a	9,90±1,54a
	T2	31,20±1,42a	3,59±0,34a	8,75±1,22a

Nota₁: RO – resíduo orgânico, T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1– poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico +biopolímero com adição de casca de aveia, COT – carbono orgânico total, NT – nitrogênio total.

Nota₂: Teores médios ± desvio padrão.

Nota₃: Letras diferentes na mesma coluna e no mesmo período representam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste Scott-Knott.

Os teores de Carbono orgânico total dos resíduos iniciais eram bem próximos, porém os teores de nitrogênio são diferentes. Dessa maneira, a relação C/N da poda de árvore foi maior que o resíduo orgânico. Taiatele (2017) obteve como COT inicial da poda de árvore o valor de 32,12% e para o resíduo orgânico, o valor de 37,96% valores próximos aos encontrados no presente trabalho. Ainda no trabalho de Taiatele (2017) o teor de Nitrogênio total obtido para a poda foi de 2,61% e para o resíduo orgânico 2,90%, valores superiores aos encontrados no presente estudo.

É possível notar que a relação C/N dos tratamentos diminuiu com o passar dos dias de tratamento, com redução de aproximadamente 40%, e é possível afirmar que não houve diferença significativa entre os tratamentos, dessa maneira os polímeros não influenciaram na relação C/N dos compostos. Esse decréscimo da relação C/N mostra que houve degradação da matéria orgânica por microrganismos, por meio da mineralização do carbono, apesar da relação C/N inicial não ser a proposta por Kiehl (2004), entre 25:1 e 35:1.

Demetrio et al. (2016) em suas análises de compostagem com resíduos sólidos de restaurante e podas de árvores, tinha uma relação C/N inicial de 13/1 e

obteve 9:1 como relação final do tratamento. Marques et al. (2016) compostaram resíduos semelhantes aos desse estudo, com uma relação inicial de aproximadamente 18:1 e ao final do processo de compostagem obtiveram valores próximos a 10:1. Pedrosa et al. (2013) também obtiveram redução da relação C/N de 28:1 para 6:1, ao compostarem podas de árvores, casca de banana e esterco ovino, obtendo uma redução de aproximadamente 80%.

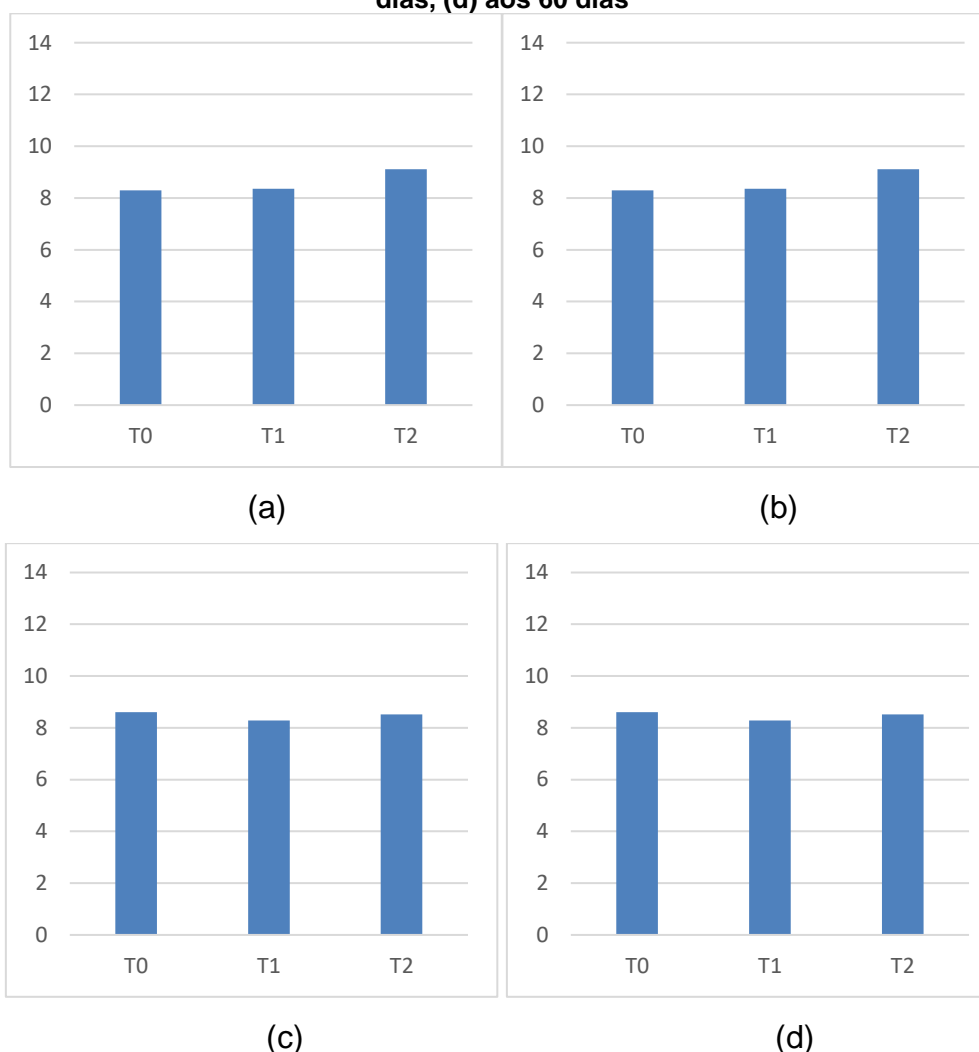
A Instrução Normativa nº 25 de 2009 do MAPA propõe que a relação C/N dos compostos orgânicos tenha um valor máximo de 20:1. Dessa maneira, os compostos produzidos nesse estudo estariam aptos para ser comercializados como fertilizante agrícola, uma vez observado somente o parâmetro relação C/N (MAPA, 2009).

5.2.2 pH

Nas análises iniciais dos resíduos, o resíduo orgânico apresentou pH de 4,5 e a poda de árvore pH de 7,04. Goes et al. (2017), em seu estudo de compostagem de podas de árvores com lodo de laticínio, obtiveram como pH da poda o valor de 6,6. Taiatele (2017) constatou que o pH inicial dos resíduos orgânicos oriundos de restaurante era mais ácido, com o valor de 3,95. Sacramento et al. (2017) ao compostarem resíduos orgânicos com podas de árvore obtiveram como resultado de pH 6,46 para a poda de árvore e 4,47 para os resíduos orgânicos, valores próximos aos observados no presente trabalho.

Após 18 dias de compostagem os tratamentos apresentaram pH mais básico, o que se manteve nas análises de 32 dias, 46 dias e 60 dias (Figura 15).

Figura 15 – pH médio durante a compostagem: (a) aos 18 dias, (b) aos 32 dias, (c) aos 46 dias, (d) aos 60 dias



Nota: T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1– poda de árvore + resíduo orgânico + biolímtero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia.

Jahnel et al. (1999) estudaram a maturidade do composto de resíduo sólido urbano e afirmaram que o pH aumentou significativamente até a terceira semana e estabilizou em aproximadamente 8,5 no fim do processo. Esse aumento é resultado dos ácidos orgânicos que foram metabolizados durante o processo de compostagem. Taiatele (2017), em seus estudos sobre compostabilidade de biopolímeros com resíduos orgânicos e poda de árvore, obteve valores finais de pH de aproximadamente 8,7 concordando com o observado no presente estudo.

A análise estatística apresentada na Tabela 21 comprova que os biopolímeros inseridos nos tratamentos T1 e T2 não influenciaram no parâmetro pH, já que não houve diferença significativa entre os tratamentos. ($p > 0,05$).

Tabela 21 - Análise estatística para valores de pH

Período	Tratamento	Média	Desvio Padrão
18 dias	T0	8,29a	0,34
	T1	8,36a	0,35
	T2	9,11a	0,11
32 dias	T0	8,65a	0,13
	T1	8,83a	0,18
	T2	8,72a	0,10
46 dias	T0	8,60a	0,27
	T1	8,28a	0,76
	T2	8,51a	0,36
60 dias	T0	9,30a	0,36
	T1	9,27a	0,18
	T2	8,96a	0,66

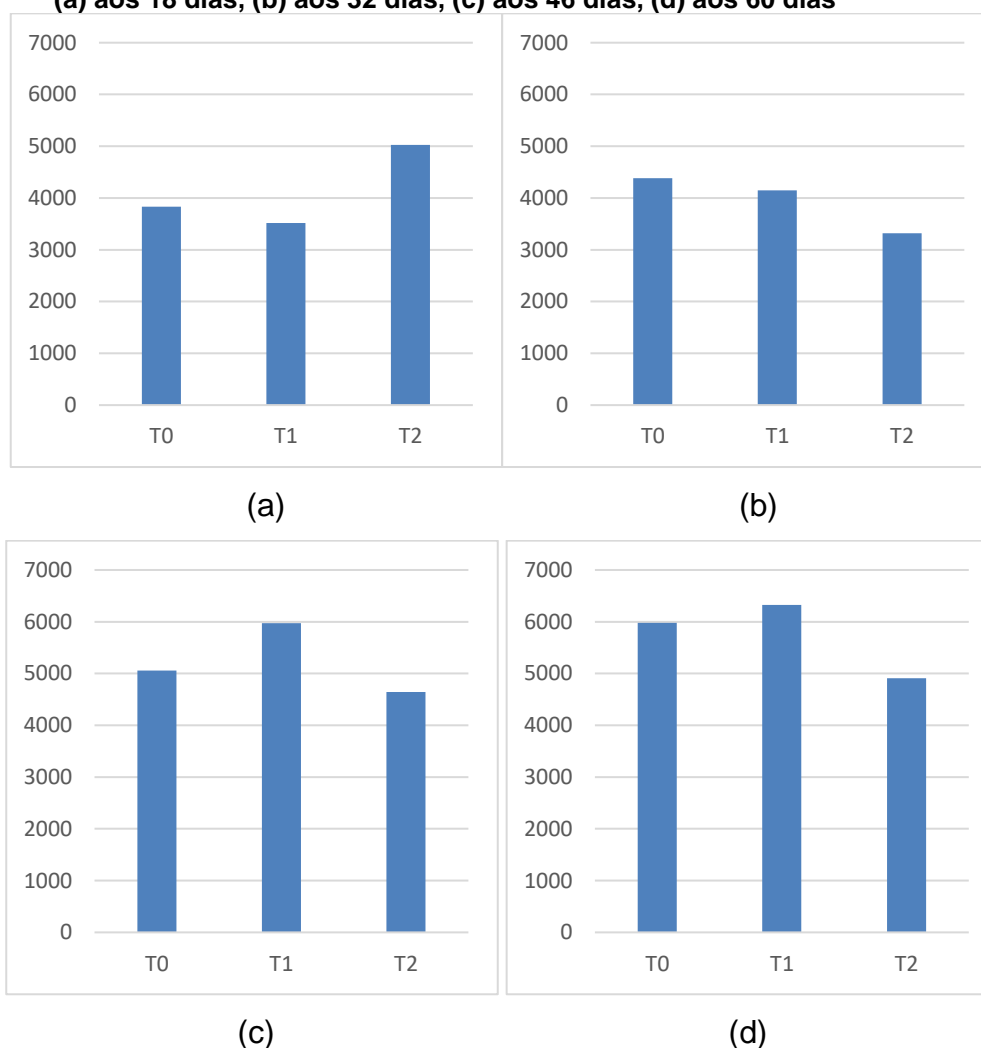
Nota₁: T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1– poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia. Nota₂: Letras diferentes na mesma coluna e no mesmo período representam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

Se somente o parâmetro pH fosse levado em consideração, esses compostos poderiam ser comercializados, uma vez que a Instrução Normativa nº 25/2009 do MAPA propõe que para comércio de fertilizantes oriundos de resíduo domiciliar o pH deve ser de no mínimo 6,5 (MAPA, 2009).

5.2.3 Condutividade Elétrica

Nas análises iniciais dos resíduos, a poda de árvore apresentou condutividade elétrica de $620 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. A condutividade elétrica inicial dos resíduos orgânicos se apresentava mais alta, com valor de aproximadamente $1300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Sacramento et al. (2017) em suas análises de condutividade elétrica para resíduos orgânicos e poda de árvores encontraram valores próximos a $2100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para os resíduos orgânicos e $474 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para a poda de árvore. Durante o processo de compostagem a condutividade elétrica das bombonas manteve-se alta, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Condutividade elétrica média ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) dos tratamentos durante a compostagem: (a) aos 18 dias, (b) aos 32 dias, (c) aos 46 dias, (d) aos 60 dias



Nota: T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia.

Apesar da oscilação durante o processo, pode ser observado que a condutividade elétrica se elevou em todos os tratamentos durante o processo. Isso se dá por razão da concentração de sais ocasionada pela redução de volume e massa. Taiateli (2017) em seus estudos sobre compostabilidade de biopolímeros obteve valores de condutividade final de aproximadamente $2000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, ou seja, um valor menor do que o observado nesse trabalho.

Na análise estatística apresentada na Tabela 22 pode-se observar que os biopolímeros não influenciaram os valores de condutividade elétrica, já que não houve diferença significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$).

Tabela 22 - Análise estatística para valores de condutividade elétrica

Período	Tratamento	Média ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Desvio Padrão
18 dias	T0	3830a	42
	T1	3520a	934
	T2	5027a	1990
32 dias	T0	4385a	375
	T1	4145a	559
	T2	3320a	339
46 dias	T0	5055a	417
	T1	5975a	219
	T2	4640a	254
60 dias	T0	5980a	99
	T1	6325a	1577
	T2	4910a	2475

Nota₁: T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1– poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia. Nota₂: Letras diferentes na mesma coluna e no mesmo período representam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

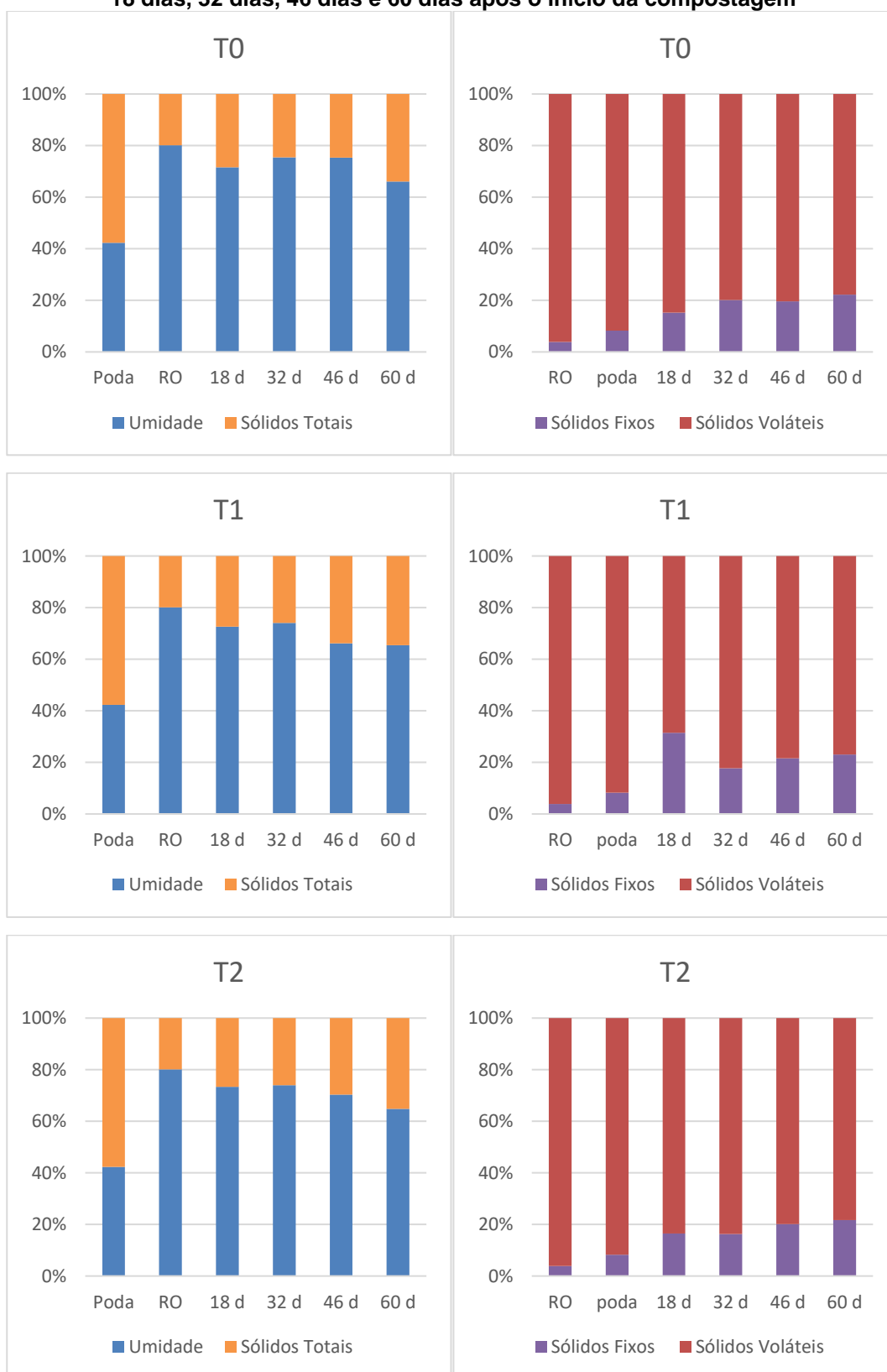
Kiehl (1985) afirma que a salinidade final dos compostos não poderia ultrapassar o valor de $4000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, uma vez que se utilizados como fertilizantes orgânicos podem prejudicar as sementes. Dessa maneira, os compostos produzidos desse estudo não estariam em condições ótimas para serem aplicados no solo, considerando o parâmetro condutividade elétrica.

De acordo com Massukado (2008) valores elevados de condutividade elétrica no composto estão diretamente relacionados com materiais ricos em sais solúveis. O principal efeito de altos teores de sais sobre as plantas é causado pela dificuldade de as plantas absorverem água. No solo os efeitos são a desestruturação, redução da fertilidade, diminuição da infiltração de água (DIAS e BLANCO, 2010). Segundo Pizarro (1996), condutividade elétrica do solo superior a $2000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pode prejudicar a produção de plantas mais sensíveis.

5.2.4 Série de Sólidos

Na Figura 17 são apresentados os teores de umidade dos resíduos no início do processo, ao longo e no composto final, assim como os Sólidos voláteis e Sólidos fixos.

Figura 17 - Umidade, Sólidos totais, Sólidos fixos e Sólidos voláteis da poda, RO (resíduo orgânico) antes do processo de compostagem e compostos dos tratamentos T0, T1 e T2 em 18 dias, 32 dias, 46 dias e 60 dias após o início da compostagem



Nota: RO - resíduo orgânico, T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1– poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia.

Nas análises iniciais, a umidade do resíduo orgânico era bem maior que a umidade da poda de árvore seca, devido ao resíduo orgânico ter em sua composição muitos pedaços de legumes e verduras. Sacramento et al. (2017) obtiveram para resíduo orgânico, a umidade de 63,36% e para poda de árvore 56,62%, diferença menor se comparada aos resíduos desse estudo.

Ao longo do processo, nos três tratamentos, a umidade dos compostos foi próxima à umidade inicial dos resíduos orgânicos, isso se dá também, devido ao fato de que no dia da montagem dos reatores houve precipitação. Dessa maneira, a poda foi inserida mais úmida no processo. Após 23 dias de compostagem, viu-se a necessidade de retirar as bombonas para fora da estufa e deixá-las no sol, a fim de diminuir a umidade no interior dos reatores.

Em nenhum momento do processo foi adicionado água nas bombonas, já que a umidade sempre estava alta. No final do processo, a umidade dos compostos era de aproximadamente 65%. A Instrução Normativa nº 25/09 do MAPA propõe que o valor máximo para umidade em fertilizantes orgânicos oriundos de resíduos domiciliares – classificado na norma como “Classe C” - seja de 50% (MAPA, 2009). Dessa maneira, os compostos obtidos neste experimento precisariam passar por um processo de secagem para atender ao estabelecido na Legislação.

Tavares et al. (2017) realizaram compostagem com resíduos orgânicos oriundos de restaurante universitário e folhas secas e ao final do processo a umidade do composto era de aproximadamente 40%. Cruz et al. (2017) compostaram lodo de esgoto com diversos tipos de material estruturante como bagaço de cana, casca de arroz e casca de eucalipto. No final da compostagem, em todos os tratamentos, os teores de sólidos totais finais dos compostos aumentaram em relação aos teores iniciais.

Os valores de sólidos voláteis da massa seca do resíduo orgânico e da poda eram, respectivamente, 96,2% e 91,7%. Além disso, é possível observar um aumento dos sólidos fixos dos compostos dos tratamentos em comparação com os valores dos resíduos iniciais. Isso se deve à volatilização da matéria orgânica em forma de gás carbônico (MASSUKADO, 2008). Ao final do processo, a porcentagem de sólidos voláteis foi aproximadamente 75%, com redução de aproximadamente 20%.

Taiatele (2017) ao compostar os mesmos resíduos desse estudo obteve porcentagem final de sólidos voláteis de aproximadamente 85%, com redução de aproximadamente 8,5%, menor que a encontrada nesse trabalho. Lopes et al. (2017), em compostagem de cama de ovinos com cal, obtiveram uma redução de aproximadamente 38% de sólidos voláteis em seus tratamentos. Sunada et al. (2015) realizaram uma pré-compostagem com os resíduos em um composteira de alvenaria e depois a compostagem em pátios de compostagem com resíduos de abatedouro agrícola e também obtiveram redução dos sólidos voláteis. Na fase de pré-compostagem verificou-se redução de 36,06% para ST e de 44,27% para SV. Durante a fase de compostagem a redução de ST foi de 21,84%. A diferença entre os valores de redução de teores de sólidos voláteis se deve ao fato da composição dos resíduos a serem compostados.

Na Tabela 23 apresenta-se a análise estatística para os valores da série de sólidos ao longo do processo de compostagem.

Tabela 23- Análise estatística para valores da série de sólidos

Período	Tratamento	Umidade	Sólidos Totais	Sólidos Voláteis	Sólidos Fixos
Inicial	Poda	42,30±8,63	57,70±8,63	91,71±1,38	8,29±1,38
	RO	80,08±4,24	19,92±4,24	96,16±0,60	3,84±0,60
32 dias	T0	75,39±3,35a	24,61±3,35a	73,09±12,01a	26,91±12,00a
	T1	74,08±4,69a	25,92±4,69a	82,27±2,66a	17,73±2,66a
	T2	73,98±1,31a	26,02±1,31a	83,75±1,62a	16,24±1,62a
46 dias	T0	75,34±0,33a	24,66±0,34a	76,40±6,97a	23,60±6,97a
	T1	66,10±1,41a	33,90±1,41a	78,40±0,39a	21,59±0,39a
	T2	70,31±5,74a	26,69±5,74a	79,84±0,17a	20,16±0,17a
60 dias	T0	66,02±1,79a	33,98±1,79a	70,82±12,67a	29,18±12,65a
	T1	65,39±3,66a	34,60±3,67a	76,92±2,68a	23,08±2,68a
	T2	64,75±5,86a	35,25±5,86a	78,28±3,34a	21,72±3,34a

Nota1: RO – resíduo orgânico, T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1– poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia.

Nota2: Teores médios ± desvio padrão.

Nota3: Letras diferentes na mesma coluna e no mesmo período representam diferença significativa ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

Nota-se, na Tabela 23, que os biopolímeros não influenciaram os valores de umidade, sólidos totais, sólidos voláteis e sólidos fixos, já que não houve diferença significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$), principalmente nos valores finais do processo.

5.3 MICRO E MACRONUTRIENTES

Os resultados para micro e macronutrientes dos compostos finais estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Teores de micro e macronutrientes dos compostos finais

Nutrientes	Tratamentos			MAPA (%)
	T0 (%)	T1 (%)	T2(%)	
Ca	11,16	9,30	9,29	1,00
Mg	1,42	1,89	1,62	1,00
Fe	0,24	0,36	0,26	0,20
Cu	0,01	0,01	0,05	0,05
Mn	0,04	0,04	0,05	0,05
Zn	0,02	0,02	0,03	0,10

Nota₁: Metodologia utilizada para Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn dissolução das cinzas com ácido clorídrico (1:1).

Nota₂: T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1– poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia.

Nota₃: MAPA – Valores mínimos propostos pela Instrução Normativa 25/2009 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2009).

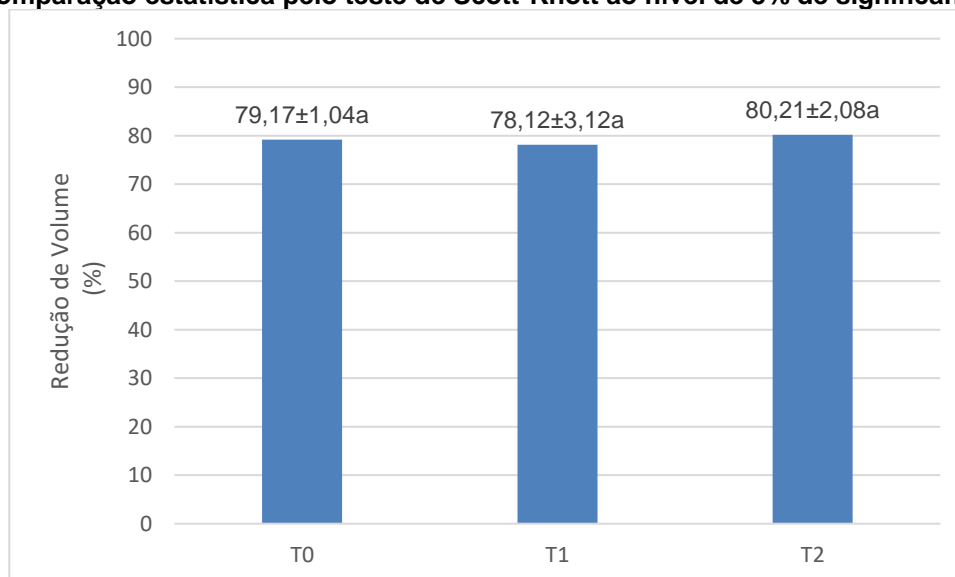
Nota₄: Verde – Dentro dos limites mínimos propostos pelo MAPA, Vermelho – Fora dos limites propostos pelo MAPA.

Os teores de cálcio (Tabela 24) nos compostos de todos os tratamentos estavam acima do valor mínimo proposto pela Instrução Normativa 25/2009, assim como os teores de magnésio e ferro. Os altos teores de magnésio nos três tratamentos são resultados da grande presença de material folhoso no resíduo utilizado na compostagem (GUIDONI et al., 2013). O elemento cobre alcançou teores superiores ao mínimo apenas para o tratamento T2, assim como o manganês. O zinco não atingiu o teor mínimo para nenhum tratamento. Tais carências poderiam ser supridas pela mistura com adubos minerais, viabilizando, assim, a comercialização dos compostos obtidos, em atendimento à Instrução Normativa 25/2009 (MAPA, 2009).

5.4 REDUÇÃO DE MASSA E VOLUME

A redução de volume dos reatores é apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Redução média de volume dos reatores durante o processo de compostagem e comparação estatística pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância

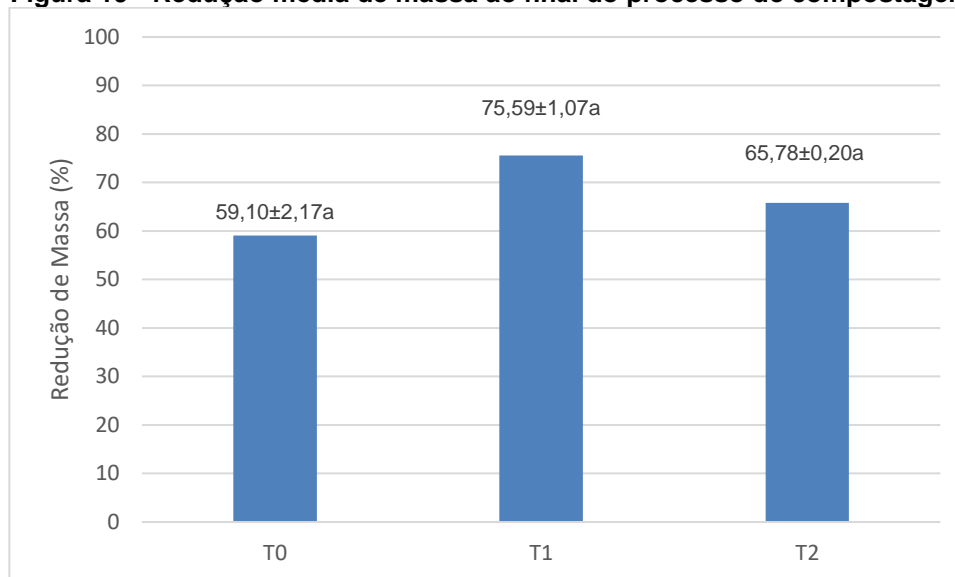


Nota: T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia.

Os três tratamentos resultaram em reduções de volume semelhantes, com valores variando entre 78,1 % (T2) e 80,2% (T0). Pode-se considerar que como todos os tratamentos obtiveram reduções de volume iguais na comparação por Scott-Knott a 5% de significância ($p=0,81$), os biopolímeros não influenciaram nesse parâmetro.

Essa grande redução era esperada, uma vez que resíduos orgânicos tendem a diminuir muito seu volume durante processos de compostagem. Taiatele (2017) ao compostar podas de árvores, resíduos orgânicos de restaurante e biopolímeros obteve reduções de volume próximas a 50%. Do mesmo modo, Demetrio et al. (2016) obtiveram 60% de redução de volume após 42 dias de compostagem com poda de árvores e resíduo orgânico oriundo de restaurante.

Na Figura 19 apresenta-se a redução média de massa seca dos reatores.

Figura 19 - Redução média de massa ao final do processo de compostagem

Nota: T0 – poda de árvore + resíduo orgânico, T1 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero sem adição de casca de aveia, T2 – poda de árvore + resíduo orgânico + biopolímero com adição de casca de aveia

As reduções de massa também foram expressivas, variando entre 59,1% (T0) e 75,59% (T2). Esses valores são semelhantes aos encontrados na literatura. Pimenta et al. (2016) obtiveram reduções de massa próximo a 58% ao compostar resíduos sólidos domiciliares e poda de árvore.

5.5 DESCARACTERIZAÇÃO DA PODA E DO RESÍDUO ORGÂNICO

A poda de árvore e os resíduos orgânicos tiveram uma boa descaracterização em todos os tratamentos ao fim da compostagem. Os resíduos orgânicos foram os que tiveram maior descaracterização, não sendo mais possível encontrá-los logo nas primeiras semanas, salvo algumas cascas de laranjas, que ainda eram encontrados no composto final, porém já em avançado estado de degradação. A poda, apesar de em menor grau que os resíduos orgânicos, estava bem descaracterizada, porém ainda era possível identificá-la. Na Figura 20 pode-se observar o composto final e a descaracterização dos resíduos.

Figura 20 - Composto Final



5.6 DEGRADAÇÃO DOS BIOPOLÍMEROS

5.6.1 Registros Fotográficos

Na Figura 21 observam-se os biopolímeros com e sem casca de aveia antes do processo de compostagem e após os 60 dias de compostagem.

Figura 21 - Registros Fotográficos dos biopolímeros inicial e ao final do processo da compostagem.



Nota₁: T1- biopolímero sem adição de casca de aveia, T2- biopolímero com adição de casca de aveia.

Fonte: Pimenta et al. (2017)

Ao final do processo ainda era possível distinguir os biopolímeros do restante dos resíduos. Após a lavagem, a fim de tirar os resíduos, foi possível constatar que o biopolímero sem adição de casca de aveia tinha se tornado mais opaco.

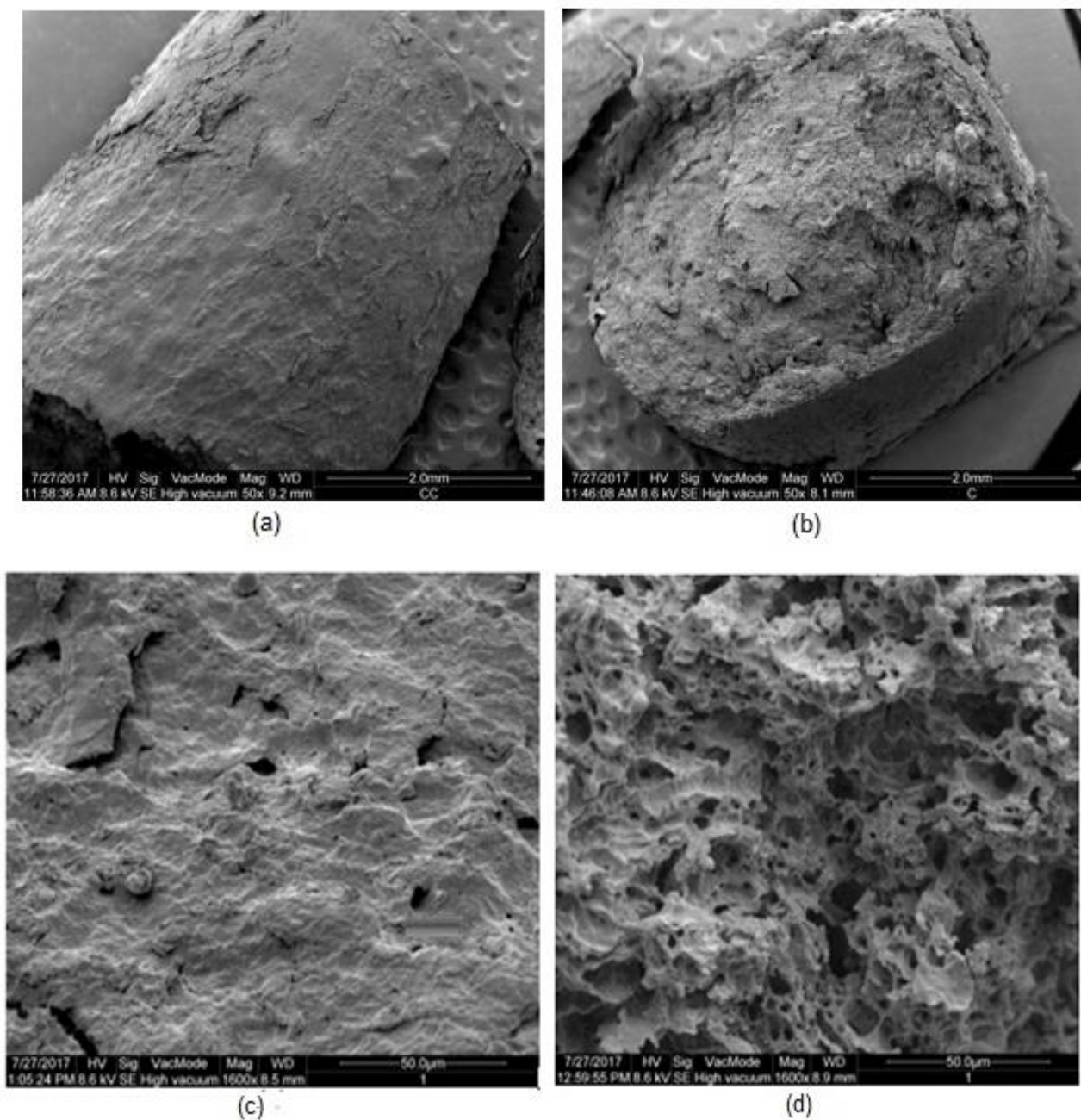
Notou-se que após o processo de compostagem, os biopolímeros ficaram mais frágeis, tornando-se mais quebradiços. Comparando os dois biopolímeros, pode-se observar que o com adição de casca de aveia ficou menos quebradiço. Isso era esperado, uma vez que a casca de aveia é usada para reforçar as estruturas do polímero e o tornar mais parecido com os convencionais (DEBIAGI et al., 2010).

Comparando a redução de tamanho dos mesmos, o biopolímeros com adição de casca de aveia reduziu aproximadamente 3,5 centímetros, já o sem casca de aveia reduziu somente 3 centímetros.

5.6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Na Figura 22 observa-se as modificações sofridas na microestrutura dos biopolímeros sem casca de aveia, obtidas com o uso de um microscópio de varredura eletrônica (MEV).

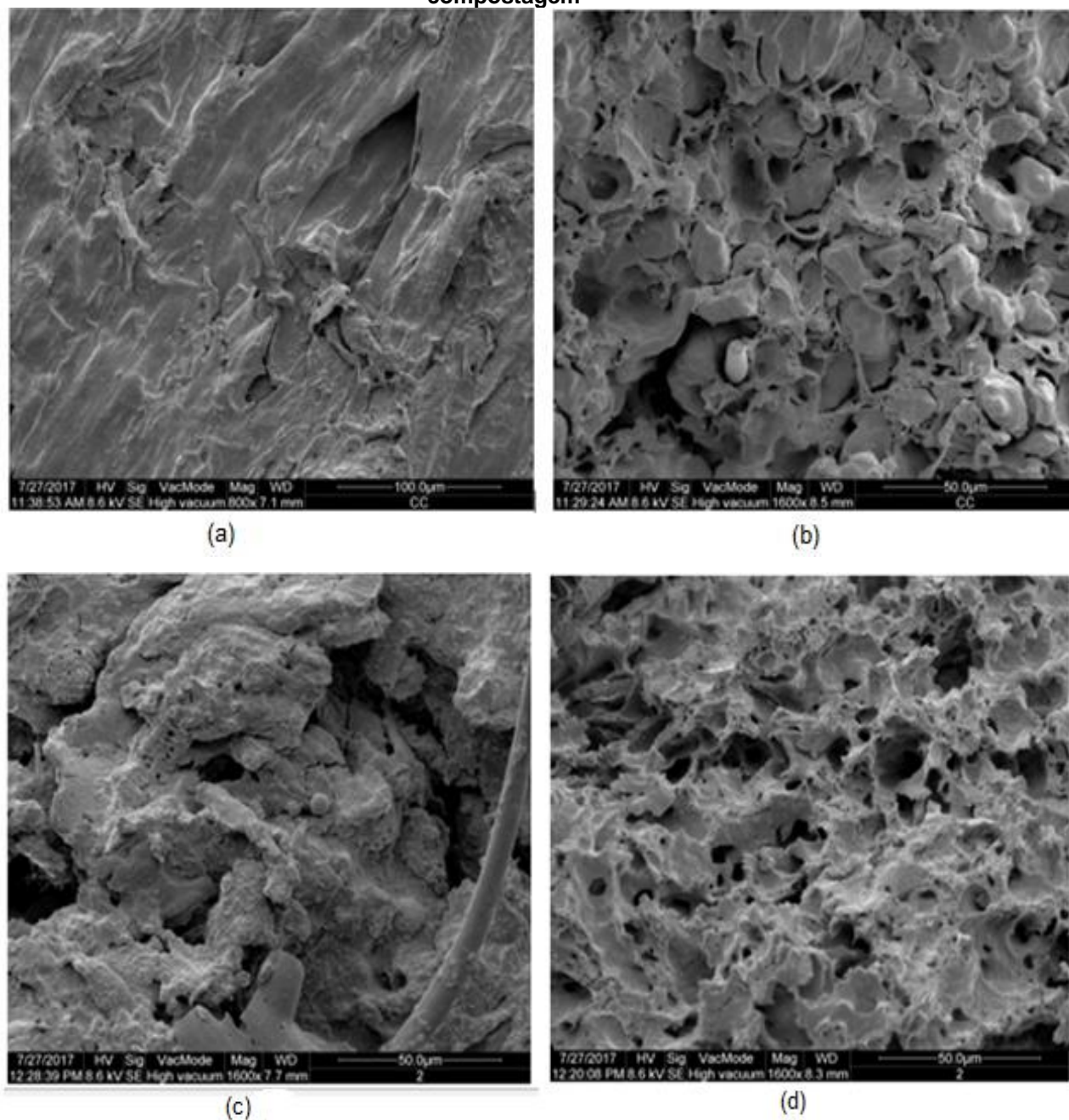
Figura 22 - Imagens de MEV dos biopolímeros com e sem casca de aveia antes e após a compostagem



Nota: (a) Superfície do biopolímero sem casca de aveia antes da compostagem. (b) Fratura do biopolímero sem casca de aveia antes da compostagem. (c) Superfície do biopolímero sem casca de aveia após compostagem. (d) Fratura do biopolímero sem casca de aveia após compostagem.

Na Figura 23 observa-se as modificações sofridas na microestrutura dos biopolímeros com casca de aveia, obtidas com o uso de um microscópio de varredura eletrônica (MEV).

Figura 23 - Imagens de MEV dos biopolímeros com a casca de aveia antes e após a compostagem



Nota: (a) Superfície do biopolímero com casca de aveia antes da compostagem. (b) Fratura do biopolímero com casca de aveia antes da compostagem. (c) Superfície do biopolímero com casca de aveia após compostagem. (d) Fratura do biopolímero com casca de aveia após compostagem.

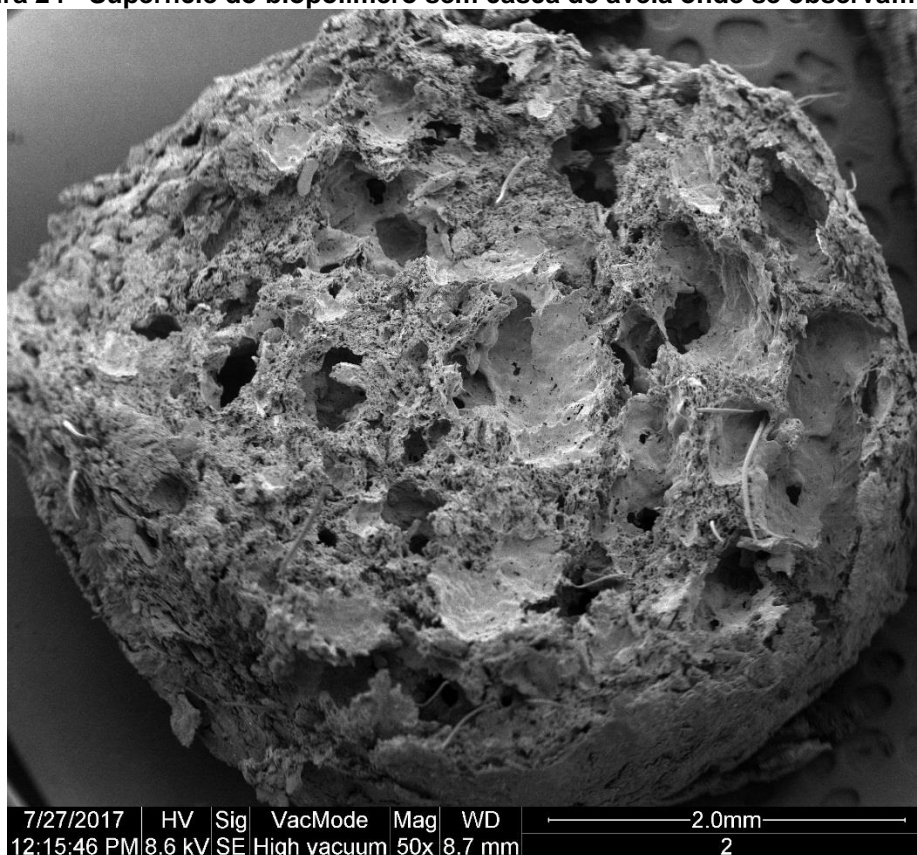
Nota-se que após a compostagem as microestruturas dos materiais passaram por mudanças e já se observam superfícies irregulares, rachaduras e orifícios que não apareciam no material antes do processo de compostagem.

Taiatele (2017) compostou polímeros compostos de PLA e amido e também observou rachaduras, orifícios e superfícies irregulares já no 20º dia após o início da compostagem.

Qiu e Netravalli (2013) ao compostatar amostras de PVA, também observaram que antes do início da compostagem a superfície do material era relativamente lisa e após 90 dias surgiram sulcos profundos, indicando degradação, e após 120 dias esses sulcos se tornaram rachaduras muito pequenas.

Com o auxílio das imagens de MEV, constatou-se a presença de fungos e bactérias na superfície e no interior dos biopolímeros. Hifas de fungos estão ilustrados na Figura 24.

Figura 24 - Superfície do biopolímero sem casca de aveia onde se observam hifas.



6 CONCLUSÃO

Considerando os seguintes resultados:

- Os biopolímeros não alteraram o comportamento do parâmetro temperatura, uma vez que os perfis foram semelhantes, com fase termofílica de aproximadamente 11 dias em todos os tratamentos.
- Apesar de o pH dos resíduos utilizados no processo apresentarem caráter ácido no início do processo, ao final da compostagem foi possível obter um composto estabilizado, tamponado e maturado.
- O composto final apresentou elevada condutividade elétrica, o que requer cuidados para o uso do composto em determinadas culturas.
- Os três tratamentos resultaram em reduções de sólidos voláteis e relação C/N final satisfatórias, sendo que os biopolímeros não interferiram nestas reduções.
- A umidade nos três tratamentos ficou acima do limite máximo proposto pelo MAPA, necessitando, assim, de algum processo de secagem, se o intuito for a comercialização.
- Alguns limites propostos pelo MAPA para micro e macronutrientes não foram atendidos, necessitando, portanto, de complementação mineral para ser comercializado.
- As reduções de volume e massa foram expressivas para os três tratamentos e os biopolímeros não interferiram neste comportamento.
- A partir dos registros fotográficos, conclui-se que o tempo de compostagem não foi o suficiente para a degradação completa dos biopolímeros. Porém, foi visível que o biopolímero sem a casca de aveia degradou mais que o com adição de casca de aveia.
- As imagens de MEV mostraram que os biopolímeros sofreram alterações em sua microestrutura, apresentando superfícies irregulares, rachaduras e orifícios que não eram encontradas nos polímeros antes da compostagem. Além disso, foi possível observar que os mesmos estavam colonizados por microrganismos.

É possível concluir que os biopolímeros estudados não interferiram no processo de compostagem e que a adição de aveia não alterou o comportamento dos parâmetros monitorados, permitindo, portanto que esses biopolímeros sejam usados como condicionadores primários de resíduos sólidos.

REFERÊNCIAS

ABICOM. **Polímeros Biodegradáveis e Compostáveis**. 2009. Disponível em: <http://media.wix.com/ugd/285c7b_05e3ee8f0e8046a2a7303a85ce0e7943.pdf>. Acesso em: 24/10/2016.

ABIPLAST. **PERFIL 2016 – Indústria Brasileira de Transformação de Material Plástico**. 2016. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/file/download/2017/Perfil_2016_Abiplast_web.pdf>. Acesso: 25/10/2017.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2012**. São Paulo-SP, 2013. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2012.pdf>>. Acesso: 20/10/2016.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2015**. São Paulo-SP, 2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>>. Acesso: 20/10/2016.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil - 2016**. São Paulo-SP, 2017. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso: 20/10/2017.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004. **Resíduos Sólidos Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15448-1: embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis: parte 1: terminologia**. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15448-2: embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis: parte 2: biodegradação e compostagem: requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2008.

APHA. AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM Standard D6400: standard specification for compostable plastics**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

BARIZON, F.; CONCEIÇÃO, P. S.; SZYMCZAK, D. A. **compostagem de resíduo de cervejaria associado a cama de aviário de peru**. In: Forum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais. Curitiba, 2017.

BARREIRA, L. P. **Avaliação das usinas de compostagem do estado de São Paulo em função do composto e processos de produção**. 2005. 204f. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental). Universidade de São Paulo, São Paulo 2005

BORSCHIVER, Suzana; ALMEIDA, Luiz F. M.; ROITMAN, Tamar. Monitoramento tecnológico e mercadológico de biopolímeros. **Polímeros**, São Carlos, v. 18, n. 3, p. 256-261, 2008.

BRASIL, **Resolução CONAMA nº 481**, de 03 de outubro de 2017. Critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Publicado no DOU em 04/10/2017, Seção 1, página 51.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2010.

BRITO, G. F.; AGRAWAL, P.; ARAÚJO, E. M.; MELO, T. J. A. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos (REMAP)**, v. 6, n. 2, p. 127-139, 2011.

BUDZIAK, C. R.; MAIA, C. M. B. F.; MANGRICH, A. S. Transformações químicas da matéria orgânica durante a compostagem de resíduos da indústria madeireira. **Química Nova**, v. 27, n. 3, p. 399-403, 2004.

CARMO, D. L. do; SILVA, C. A. Métodos de Quantificação de Carbono e Matéria Orgânica em Resíduos Orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1211-1220, 2012.

CRUZ, C. V.; MATEUS, de M. D.; VILLAS BÔAS, R. L.; GABIRA, M. M.; FERNANDES, D. M.; da SILVA, M. R. **Características Físicas E Químicas Na Compostagem Do Lodo De Esgoto Com Três Tipos De Materiais Estruturantes**. In Forum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais, vol. 8, n. 8, 2017.

DIAS, N. da S.; BLANCO, F. F. Efeitos dos sais no solo e na planta. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S.; LACERDA, C. F. de. In: **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza, INCT Sal, 2010. cap.9, p.129-140.

DEBIAGI, F. **Desenvolvimento de bandejas biodegradáveis de amido, bagaço de mandioca e álcool polivinílico com a incorporação de agentes antimicrobianos**. 166f. 2013. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Universidade Estadual de Londrina, 2013.

DEBIAGI, F.; Ivano, L. R. P. F. M.; do Nascimento, P. H. A.; de Oliveira, S. M. Embalagens biodegradáveis de amido reforçadas com fibras lignocelulósicas provenientes de resíduos agroindustriais. **BBR-Biochemistry and Biotechnology Reports**, v. 1, n. 2, p. 57-67, 2013.

DEBIAGI, F.; MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F. Efeito de fibras vegetais nas propriedades de compósitos biodegradáveis de amido de mandioca produzidos via extrusão. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n.6, p. 1522-1529, 2010.

DEMETRIO, L. F. F.; NAKAGAWA, D. H.; PINTO, A. L. de S.; PRESUMIDO, P. H.; BERTOZZI, J.; MICHELS, R. N.; DAL BOSCO, T. C.; PRATES, K. V. M. C. **Compostagem Em Pequena Escala De Resíduos Sólidos De Restaurante Universitário Associado A Poda De Árvores.** In: XIII CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS 2016, Poço de Caldas, 2016

EPSTEIN, E. **The Science of Composting.** CRC Press, 1997.

EUROPEAN STANDARDS (EN). **EN 13432:** requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation. 2000.

EUROPEAN STANDARDS (EN). **EN 14045:** packaging: evaluation of the disintegration of packaging materials in practical oriented tests under defined composting conditions. 2003.

FARIAS, A., JUCÁ, J.F.T. **Propriedades físicas dos resíduos sólidos do aterro de Muribeca.** In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Porto Alegre. 2000.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de biossólidos.** Londrina: PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 1999.

FIORI, M. G. S.; SCHOENHALS, M.; FOLLADOR, F.A.C. Análise da evolução tempo-eficiência de duas composições de resíduos agroindustriais no processo de compostagem aeróbia. **Engenharia Ambiental**, v. 5, n.3, p.178-191, 2008.

FURLAN, L. G.; DUARTE, U. L.; MAULER, R. S.. Avaliação das propriedades de compósitos de polipropileno reforçados com casca de aveia. **Química Nova**, v. 35, n. 8, p. 1499-1501, 2012.

GOES, H. H. D.; de OLIVEIRA, B. A. M.; de MELO, J. M.; de SOUZA, R. D. C. P.; MARQUES, V. da C.; de OLIVEIRA, W. L.; DAL BOSCO, T. C. **Compostagem De Resíduo Agroindustrial E Poda De Árvore Com Aplicação De Microrganismos Eficientes.** In Forum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais Vol. 8, No. 8. 2012.

GOMES, A. P. **Fundamentos da compostagem de resíduos sólidos.** 333 f. 2001. Tese (Doutorado em Ciências Aplicada ao Meio Ambiente) – Universidade de Aveiro, 2001.

GÓMEZ, E. F.; MICHEL, F. C. Jr. Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation. **Polymer Degradation and Stability.** v. 98, pp. 2583-2591, 2013.

GRAEPIN, C.; FOLLMAN A. J.; SCHROEDER, J. K; NEUHAUS, F; RODRIGUES, A. C.; KEMERICH, P. D. da C. Compostagem como Alternativa de Destinação para o Lodo Flotado de Abatedouro de Frangos. **Monografias Ambientais**, v. 13, n. 5, p. 4011-4018, 2014.

GUIDONI, L. L. C.; BITTENCOURT, G.; MARQUES, R. V.; CÔRREA, L. B.; CÔRREA, E. K. Compostagem domiciliar: Implantação e avaliação do processo. *Tecno-Lógica*, v. 17, n. 1, p. 44-51, 2013.

HECK, K., DE MARCO, É. G., HAHN, A. B., KLUGE, M., SPILKI, F. R., & VAN DER SAND, S. T. Temperatura de degradação de resíduos em processo de compostagem e qualidade microbiológica do composto final. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, pp. 54-59, 2013.

HERBETS, R. A.; COELHO, C. R. de A.; MILETTI, L. C.; MENDONÇA, M. M. de. Compostagem de resíduos sólidos orgânicos: aspectos biotecnológicos. **Revista Saúde e Ambiente / Health and Environment Journal**, v. 6, n. 1, 2005

·
IPEA. **Caderno de Diagnóstico – Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília-DF. 2012. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf . Acesso em: 1 nov. 2016.

IVANO, L. R. P. F. M. **Bandejas biodegradáveis a base de amido de mandioca e resíduo fibroso da indústria cervejeira**. 120f. 2013. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Universidade Estadual de Londrina, 2013.

JAHNEL, M. C.; MELLONI, R.; CARDOSO, E. J. B. N. Maturidade De Composto De Lixo Urbano. **Scientia Agrícola**. Piracicaba, v. 56, n. 2, p. 301-304, 1999.

KALE, G.; AURAS, R.; SINGH, S. P.; NARAYAN, R. Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions. **Polymer Testing**, v. 26, pp. 1049-1061, 2007.

KIEHL, E. J. **Manual de Compostagem: maturação e qualidade do composto**. Piracicaba - SP, 4ª ed., 2004

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba. Editora Agronômica Ceres Ltda., 1985. 492p.

LOPES, W. R. T.; ORRICO, A. C. A.; JUNIOR, M. A. P. O.; SUNADA, N. da S.; MANARELLI, D. M.; FAVA, A. F. Efeito da hidrólise alcalina sobre a compostagem da cama obtida durante a terminação de ovinos. **Agrarian**, Dourados, v. 10, n. 35, p. 70-75, jul. 2017.

MACHADO, A. R. T.; MARTINS, P. F. Q.; FONSECA, E. M. B.; REIS, K. C. Compósitos biodegradáveis a base de polihidroxibutirato-hidroxicvalerato (PHB-HV) reforçados com resíduos do beneficiamento do café. **Revista Matéria**, v. 15, n. 3, p. 400-404, 2010.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2ª Ed. Piracicaba. : Potafos, 1997.319p.

MAPA. Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009. Aprova as normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a

rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. **Diário Oficial da União República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 28 jul. 2009.

MARAGNO, E.; TROMBIN, D. F.; VIANA, E. O uso da serragem no processo de minicompostagem. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 355-360, 2007.

MARENGO, V. A.; VERCEHEZE, A. E. S.; MALI, S. Compósitos biodegradáveis de amido de mandioca e resíduos da agroindústria. **Química Nova**, v. 36, pp. 680-685, 2013.

MARQUES, V. da C.; PIMENTA, A. F.; JÚNIOR, I. T., Dal BOSCO, T. C.; MICHELS, R. N.; BERTOZZI, J. **Compostagem De Resíduos Orgânicos Domiciliares E Poda De Árvores: Parâmetros Físico-Químicos**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 2016, Brasília, 2016.

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

MELO, V. L. A., JUCÁ, J.F.T. **Estudos de referência para diagnóstico ambiental em aterros de resíduos sólidos**. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000, Porto Alegre. 2000.

MOHEE, R.; UNMAR, G. Determining biodegradability of plastic materials under controlled and natural composting environments. **Waste management**, v. 27, n. 11, p. 1486-1493, 2007.

MORASSI, O. J. **Polímeros termoplásticos, termofixos e elastômeros**. Minicursos CRQ 2013, 2013. Disponível em: <http://www.crq4.org.br/sms/files/file/apostila_pol%C3%ADmeros_0910082013_site.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2017

NASCIMENTO, P. H. A. ; MARIM, R. G. ; CARVALHO, G.M. ; MALI, S. . Nanocellulose Produced from Rice Hulls and its Effect on the Properties of Biodegradable Starch Films. **Materials Research**, v. 19, p. 167-174, 2016

NOGUEIRA, C. F. O. **Estudo de polímeros biodegradáveis e compostáveis de fontes renováveis como alternativa aos polímeros tradicionais**. 73f. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Bioquímica) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2013.

NOGUEIRA, W. A.; COSTA, D. D. **Variação da temperatura na compostagem de resíduos sólidos orgânicos**. Espírito Santo, 1996.

NUNES, M. U. C. **Compostagem de resíduos para produção de adubo orgânico na pequena propriedade**. Circular técnico – Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, n.59, 7p., dez. 2009.

OLIVATO, J. B. ; MARINI, J. ; YAMASHITA, F. ; POLLET, E. ; GROSSMANN, M. V. E. ; AVÉROUS, L. . Sepiolite as a promising nanoclay for nano-biocomposites based on starch and biodegradable polyester. **Materials Science & Engineering. C, Biomimetic Materials, Sensors and Systems**, v. 70, p. 296-302, 2017.

OLIVEIRA, E.C.A. de; SARTORI, R.H.; GARCEZ, T.B. **Compostagem**. Piracicaba, 2008. 19p. Disciplina: Matéria Orgânica do Solo (LSO-897). Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2008

PEDROSA, M. C. G.; DE MENEZES, L. R.; DA SILVA, E. O. Efeito de nanotubos de carbono sobre as propriedades térmicas e mecânicas de biopolímeros. **Acta Scientiae et Technicae**, v. 4, n. 1, 2016.

PEDROSA, T. D., FARIAS, C. A. S., PEREIRA, R. A., DO RÊGO FARIAS, E. T. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 44-48, 2013.

PEIXE, M.; HACK, M. B. **Compostagem como método adequado ao tratamento dos resíduos sólidos orgânicos urbanos**. Experiência do Município de Florianópolis/SC. Florianópolis, 2014.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de Compostagem**. UNICEF. Belo Horizonte-MG, 1996. 56p.

PIMENTA, A. F.; MARQUES, V. da C.; TAIATELE JUNIOR, I.; DAL BOSCO, T. C.; BERTOZZI, J.; MICHELS, R. N. **Temperatura E Redução De Massa E Volume Em Processo De Compostagem De Resíduos Orgânicos Domiciliares E Poda De Árvores**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 2016, Brasília, 2016.

PIZARRO, F. **Riegos Localizados de Alta Frecuencia**. 3ª Edição. Madri, Espanha. Ediciones Mundi-Prensa. 511p, 1996.

QIU, K.; NETRAVALI, A. N. Halloysite nanotube reinforced biodegradable nanocomposites using noncrosslinked and malonic acid crosslinked polyvinyl alcohol. **Polymer Composites**, v. 34, n. 5, p. 799-809, 2013.

RUDNIK, E. Compostable Polymer Materials: Definitions, Structures, and Methods of Preparation. In: Ebnesajjad, Sina. **Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties, Processing and Applications**. William Andrew, 462 p., 2013.

SACRAMENTO, B. H., NONAKA, F. M., COSTA, L. R. de L., SHIRAISHI, I. S., DAL BOSCO, T. C. **Degradação De Podas De Árvores, Resíduos Orgânicos Alimentares, Palitos De Fósforo E Guardanapos Usados Por Meio Do**

Processo De Vermicompostagem. In *Forum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais*. Vol. 8, No. 8, 2017

SALGADO, P.R.; SCHMIDT, V.C.; ORTIZ, S.E.M.; MAURI, A.N.; LAURINDO, J. Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process. **Journal of Food Engineering**, Kidlington Oxford, v.85, p.435-443, 2008.

SCHALCH, V.; MASSUKADO, L. M.; BIANCO, C. I. Compostagem. In: NUNES, R.R.; REZENDE, M. O. O. **Recurso solo: Propriedades e Usos**. São Carlos: Editora Cubo, Cap. 19. P. 633-654, 2015.

SHIRAI, M. A.; OLIVATO, J. B.; DEMIATE, I. M.; MÜLLER, C. M.O.; GROSSMANN, M. V. E. ; YAMASHITA, F. Poly(lactic acid)/thermoplastic starch sheets: effect of adipate esters on the morphological, mechanical and barrier properties. **Polímeros**, v. 26, p. 66-73, 2016.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2015**. 2017. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos>. Acesso em: 06/04/2017

SOUZA, S. J. ; MARCHIORE, N. G.; GALINDO, M. V. ; YAMASHITA, F. ; SHIRAI, M. A. . Produção de laminados de amido/poli(ácido láctico) contendo ácido cítrico e citrato de tributíla. **Brazilian Journal of Food Research**, v. 7, p. 173-184, 2016.

STANDARDS AUSTRALIA. **AS ISO 14855**: plastic materials: determination of the ultimate aerobic biodegradability and disintegration under controlled composting conditions: method by analysis of evolved carbon dioxide. Sydney, 2005.

SUEIRO, A. C.; FARIA-TISCHER, P.C.S. ; LONNI, A.S.G. ; MALI, S. . Filmes biodegradáveis de amido de mandioca, pululana e celulose bacteriana. **Química Nova**, v. 39, p. 1059-1064, 2016.

SUNADA, N. da S.; ORRICO, A. C. A.; JUNIOR, M. A. P. O.; CENTURION, S. R.; OLIVEIRA, A. B. de M.; FERNANDES, A. R. M.; JUNIOR, J. de L; SENO, L. de O. Compostagem de resíduo sólido de abatedouro avícola. **Ciência Rural**, v.45, n.1, p.178-183, 2015.

TAIATELE, I. Jr. **Biodegradabilidade De Embalagens Biodegradáveis E Sua Compostabilidade Com Resíduos Orgânicos Domiciliares**. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade tecnológica Federal do Paraná- Campus Londrina, 2014.

TAIATELE, I. Jr; DAL BOSCO, T. C.; BERTOZZI, J.; MICHELS, R. N.; FREITAS, B. de O. **Automatização Do Monitoramento De Temperatura De Leiras De Compostagem Em Alta Resolução Temporal**. In: XLIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, São Pedro, 2015.

- TAIATELE, I. Jr. **Compostabilidade e hidrólise abiótica de blendas e amido e outros materiais poliméricos**. 2017. 124f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.
- TAVARES, L. G.; de OLIVEIRA, A. G. de M.; FIGUEIREDO, V. O.; QUINTAES, B. R.; AMORIM, V. R.; MENESCAL, A. **Compostagem De Resíduos Sólidos Em Reator: Gestão De Resíduos Sólidos Orgânicos Gerados No Restaurante Universitário Da Universidade Federal Do Rio De Janeiro**. In Forum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais, vol. 8, n. 8, 2017
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2º ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995, 175 p.
- TITA, S. P. S.; PAIVA, J. M. F. de; FROLLINI, E.. Resistência ao impacto e outras propriedades de compósitos lignocelulósicos: matrizes termofixas fenólicas reforçadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 12, n. 4, p. 228-239, 2002.
- TORO, A. S. **Avaliação da degradação de resíduos sólidos orgânicos por meio da compostagem com presença de embalagem compostável**. 2016. 89f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. 10.ed. Porto Alegre: Artmed, 2012.
- VALENTE, B. S.; XAVIER, E.G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D. S.; BRUM, B. de S. Jr.; CABRERA, B. R.; MORAES, P. de O.; LOPES, D. C. N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de zootecnia**. v.58. p.60-76, 2009.