



**Análise do reaproveitamento dos Resíduos  
Orgânicos gerados no Restaurante  
Universitário do Centro de Tecnologia por  
meio de Compostagem**

**Augusto Luiz Panno Guimarães  
Juliana Victorino Dias**

**Projeto Final de Curso**

**Orientadores  
Marcelo Mendes Viana  
Roberto Bentes de Carvalho**

**Julho de 2018**

# **Análise do reaproveitamento dos Resíduos Orgânicos gerados no Restaurante Universitário do Centro de Tecnologia por meio de Compostagem**

***Augusto Luiz Panno Guimarães***

***Juliana Victorino Dias***

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Químico Industrial.

Aprovado por:

---

Valéria Castro de Almeida, D.Sc.

---

Suzanne Hoffmann, D.Sc.

---

Mariana Santos Lemos, M.Sc.

Orientado por:

---

Marcelo Mendes Viana, D.Sc.

---

Roberto Bentes de Carvalho, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Julho de 2018

Guimarães, Augusto Luiz Panno;  
Dias, Juliana Victorino

Análise do reaproveitamento dos resíduos orgânicos gerados no restaurante universitário do centro de tecnologia por meio de compostagem / Augusto Luiz Panno Guimarães e Juliana Victorino Dias. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2018.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Escola de Química, 2018.

Orientadores: Marcelo Mendes Viana e Roberto Bentes de Carvalho

1. Compostagem 2. Resíduos Sólidos 3. Análise Térmica 4. Restaurante Universitário 5. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 6. Marcelo Mendes Viana I D.Sc. e Roberto Bentes de Carvalho I D.Sc.. Análise do reaproveitamento dos Resíduos Orgânicos gerados no Restaurante Universitário do Centro de Tecnologia por meio de Compostagem.

## **AGRADECIMENTOS - Augusto**

Eu, Augusto Luiz Panno Guimarães, gostaria de ressaltar a importância e agradecer

Aos meus pais e irmão, Luiz Ernesto, Valéria e Matheus, por toda a educação, suporte, amor e carinho que sempre me deram e por acreditarem e torcerem por mim. Tudo que sou e tenho hoje é graças aos seus imensuráveis esforços.

A Juliana, por ser o fechamento perfeito para esse trabalho dar certo, pela paciência e dedicação no projeto e principalmente pela amizade incondicional nesses anos de faculdade que só aumentou nessa reta final que dividimos juntos.

Ao Mult4, pelos melhores e mais carteados anos de amizade que os fizeram meus irmãos, dos corredores do Martins para o resto da minha vida; e por sempre aliviarem, mesmo que sem perceber, o estresse de ser um universitário; “valeu por você existir, amigo”.

A Isabel, por todo o companheirismo, apoio, carinho e acima de tudo, sua amizade; por me fazer acreditar em mim mesmo quando eu não acreditei e pelas experiências que só existiram graças a sua presença e incentivo.

Ao KECHO, por transformarem qualquer jogo ou evento em um ótimo motivo para se encontrar, conversar e pedir um zap zap.

Ao meu orientador, Prof. Marcelo, pelo desafio de nos orientar, pelas diversas ideias e propostas de aprimorar o projeto, pelos ensinamentos e auxílio na execução de todas as análises e pela grande e incansável preocupação em ajudar neste trabalho.

Ao #EuVoltei, por todas as embaixadas, simulações, diegadas nas provas, chás de bebê e fifas fundamentais durante esses anos de convívio.

A todos os amigos e colegas, que fizeram parte dessa caminhada e mesmo que indiretamente me ajudaram a concluir essa etapa da minha vida.

A todos os funcionários, técnicos, docentes e a própria Escola de Química da UFRJ pela experiência estressante e gratificante que foi ser aluno desta instituição.

## **AGRADECIMENTOS - Juliana**

Eu, Juliana Victorino Dias, gostaria de agradecer primeiramente a minha família, Magda Claudia Victorino Dias, José Luiz de Souza Dias e Fernanda Victorino Dias.

Ao meu grande pai, José Luiz, que é o exemplo de ser humano que eu me espelho todos os dias, aquele que nunca deixou desistir dos meus objetivos, aquele que me confortava e me acalmava nos momentos mais difíceis, aquele que acreditava e se orgulhava imensamente de mim. Pai, quero que você esteja muito feliz e orgulhoso de mim, essa vitória é nossa, graças a todos os ensinamentos e oportunidades de conhecimentos que você e minha mãe me proporcionaram. Saiba que eu sempre vou admirar e que a saudade sempre estará apertando meu coração. Te amo, pai.

A minha mãe, Magda Claudia, por sempre me apoiar, me dar forças nas várias noites de estudos e por toda amizade e laço que nós temos. A minha irmã, Fernanda, que é mais que uma irmã, é minha melhor amiga e parceira da vida. Eu amo muito vocês duas e faço qualquer coisa por vocês.

Ao meu parceiro de tcc, Augusto Guimarães, que tive o prazer de criar um vínculo desde do início da faculdade e que para finalizar a faculdade a escolha não poderia ser melhor. Obrigada por toda essa sintonia e saiba que essa amizade que só cresceu, se estenderá pro resto da vida.

As meninas do colégio Bahiense, de Iguaba, aos meninos do Edifício Patrícia e aos amigos de intercâmbio. Vocês são os melhores amigos que eu poderia ter e todo o suporte e momentos juntos me permitiram chegar aonde eu cheguei hoje com mais alegria e leveza.

Aos amigos da UFRJ, para turma 2011.1, que estiveram nessa jornada desde o início, no qual eu tive oportunidade de criar laços especiais e foram companheiros de muitas provas e sofrimentos. E para os amigos da turma 2012.2, que ao voltar do intercâmbio me acolheram e tornaram o fim da minha faculdade muito mais tranquilo, feliz e cheio dos melhores eventos, vocês são sensacionais.

Ao, meu orientador, professor Marcelo Mendes Viana, que não mede esforços para permitir que o trabalho seja o melhor de todos e pela leveza que foi fazer as reuniões ao decorrer da preparação.

E por fim, a todos meus amigos, colegas e integrantes da Escola de Química da UFRJ, vocês fizeram parte dessa caminhada e desafios.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Químico Industrial.

## **Análise do reaproveitamento dos Resíduos Orgânicos gerados no Restaurante Universitário do Centro de Tecnologia por meio de Compostagem**

Augusto Luiz Panno Guimarães

Juliana Victorino Dias

Julho, 2018

Orientadores: Prof Marcelo Mendes Viana, D.Sc.

Prof. Roberto Bentes de Carvalho, D.Sc.

A larga geração de resíduos sólidos e a falta de uma alternativa adequada, que seja logística e economicamente viável, para a destinação final dos mesmos no Brasil é considerado uma problemática a ser solucionada. De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) divulgado em 2012, aproximadamente 184 mil toneladas (31,9% de materiais recicláveis e 51,4% de materiais orgânicos) de resíduos sólidos são produzidos por dia no Brasil. Uma solução eficiente, porém não muito explorada, de tratamento é a compostagem. Essa forma de reciclagem permite eliminar metade dos obstáculos gerados pelo destino final dos resíduos sólidos, permitindo um melhor controle da erosão do solo, da sua estrutura, evita o uso de fertilizantes sintéticos, além de reduzir o acúmulo de resíduos nos aterros. O objetivo do trabalho é analisar o processo de compostagem feito com o foco em reaproveitar os resíduos sólidos gerados pelo Restaurante Universitário (RU) do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio de Janeiro visando produzir adubo orgânico estabilizado. Através das técnicas e experimentos conduzidos no presente trabalho foi possível notar a eficiência do processo de compostagem ao verificar a variação na composição das amostras de diferentes idades. Esses resultados demonstraram a evolução na qualidade do composto formado ao longo do processo com o aumento do percentual de carbono fixo nas amostras. Ademais, a aplicação do produto final no cultivo de sementes de feijão corroborou com as conclusões anteriores quanto a eficiência do composto como adubo orgânico.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
3.1. RESÍDUOS SÓLIDOS .....	4
<b>3.1.1. Definições</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1.2. Classificações</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1.3. Geração de Resíduos Sólidos</b> .....	<b>6</b>
3.2. TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	7
<b>3.2.1. Compostagem</b> .....	<b>8</b>
3.2.1.1. Definição e Histórico.....	8
3.2.1.2. Compostagem no Brasil e no mundo .....	10
3.2.1.3. Principais fatores que influenciam a compostagem.....	15
3.2.1.4. Fases do processo de compostagem .....	16
3.2.1.5. Tipos de compostagem .....	17
3.2.1.6. Principais constituintes da compostagem.....	18
3.3. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO .....	19
<b>3.3.1. Análise Térmica</b> .....	<b>19</b>
3.3.1.1. Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG) .....	21
3.3.1.2. Análise Térmica Diferencial (DTA) .....	23
3.3.1.3. Aplicação da Análise Térmica em compostagem .....	24
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
4.1. COMPOSTAGEM UTILIZANDO AERAÇÃO PASSIVA EM LEIRA.....	27
4.2. COMPOSTAGEM EM BOMBONA DE 200 LITROS.....	31
4.3. APLICAÇÃO DO ADUBO ORGÂNICO .....	32
<b>4.3.1. Análise Estatística</b> .....	<b>33</b>
4.4. CARACTERIZAÇÕES.....	35
<b>4.4.1. Análise térmica</b> .....	<b>36</b>
<b>4.4.2. Análise Imediata</b> .....	<b>36</b>
<b>4.4.3. Difração de Raios X</b> .....	<b>37</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>38</b>
5.1. COMPOSTAGEM UTILIZANDO AERAÇÃO PASSIVA EM LEIRA.....	38

5.2. COMPOSTAGEM EM BOMBONA DE 200 LITROS.....	39
5.3. CARACTERIZAÇÕES.....	41
<b>5.3.1. Difração de Raios X</b> .....	<b>41</b>
<b>5.3.2. Análise térmica</b> .....	<b>44</b>
5.3.2.1. Comparação das coletas em N <sub>2</sub> .....	49
5.3.2.2. Comparação das coletas em ar .....	50
<b>5.3.3. Análise Imediata</b> .....	<b>53</b>
5.4. APLICAÇÃO DO ADUBO ORGÂNICO .....	55
<b>5.4.1. Análise Estatística</b> .....	<b>59</b>
5.4.1.1. Comparação de substratos com e sem adição de composto orgânico .....	60
5.4.1.2. Comparação de substratos com adição de composto orgânico em diversos percentuais.....	63
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>67</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>69</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Fluxograma da caracterização e classificação dos resíduos sólidos. ....	6
<b>Figura 2:</b> Hierarquia de ações para gestão de resíduos sólidos.....	8
<b>Figura 3:</b> Quantidade de resíduos tratados na EU-27 (kg per capita) por tipo de tratamento. ....	11
<b>Figura 4:</b> Estrutura química da celulose, hemicelulose e lignina. ....	19
<b>Figura 5:</b> Principais técnicas termoanalíticas. ....	20
<b>Figura 6:</b> Esquemática de um equipamento utilizado para análise térmica.....	22
<b>Figura 7:</b> Esquema do equipamento utilizado para análise DTA.....	23
<b>Figura 8:</b> Fluxograma resumido das atividades realizadas. ....	26
<b>Figura 9:</b> Placa do Projeto MUDA localizada no estacionamento do bloco A do CT. ....	27
<b>Figura 10:</b> Preparo da mistura de resíduos orgânicos e folha.....	28
<b>Figura 11:</b> Leira 2 após sua montagem.....	29
<b>Figura 12:</b> Montagem da compostagem com bombona de 200L. ....	31
<b>Figura 13:</b> Fôrma de plástico e seus compartimentos com diferentes substratos para cultivo de feijão.....	33
<b>Figura 14:</b> Diagrama Boxplot e suas medidas.....	34
<b>Figura 15:</b> Cores dos materiais coletados durante o processo de aeração passiva em leira.....	38
<b>Figura 16:</b> Perfil de temperatura medido pelo termopar inserido no interior da bombona em função do tempo de compostagem. ....	39
<b>Figura 17:</b> Comparação dos períodos de tempo em fase mesofílica e termofílica para diversos processos de compostagem utilizando resíduos variados. ....	40
<b>Figura 18:</b> Difrátograma de raios-X para o solo (Q=Quartzo= $\text{SiO}_2$ , C=Caulinita= $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , I=Ilita= $3\text{K}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 26\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ). ....	42
<b>Figura 19:</b> Difrátograma de raios-X para os restos de comida e folha utilizados nos processos de compostagem.....	43
<b>Figura 20:</b> Difrátograma de raios-X para a mistura inicial e mistura final coletadas no processo de compostagem (Q=Quartzo= $\text{SiO}_2$ ). ....	43
<b>Figura 21:</b> Curvas TG, DTG e DTA para a folha (coleta 1) analisada em atmosfera de ar (esquerda) e $\text{N}_2$ (direita).....	44

<b>Figura 22:</b> Curvas TG, DTG e DTA para o resto de comida (coleta 1) analisado em atmosfera de ar (esquerda) e N <sub>2</sub> (direita).	46
<b>Figura 23:</b> Curvas TG, DTG e DTA para a mistura inicial (coleta 1) analisada em atmosfera de ar (esquerda) e N <sub>2</sub> (direita).	47
<b>Figura 24:</b> Curvas TG, DTG e DTA para a mistura final (coleta 19) analisada em atmosfera de ar (esquerda) e N <sub>2</sub> (direita).	47
<b>Figura 25:</b> Curvas TG e DTG em base seca para as misturas de diferentes idades analisadas em N <sub>2</sub> .	50
<b>Figura 26:</b> Variação da proporção de perda de massa nas misturas de várias idades.	52
<b>Figura 27:</b> Comparação das curvas DTG em ar dos compostos de diferentes idades.	53
<b>Figura 28:</b> Curvas TG, DTG, temperatura e os percentuais de umidade, material volátil, carbono fixo e cinzas obtidos para a mistura inicial.	54
<b>Figura 29:</b> Curvas TG, DTG, temperatura e os percentuais de umidade, material volátil, carbono fixo e cinzas obtidos para a mistura final.	54
<b>Figura 30:</b> Desenvolvimento dos pés de feijão nos compartimentos com diferentes substratos.	56
<b>Figura 31:</b> Comparação mássica da biomassa total, biomassa da parte aérea e biomassa de raízes nos diferentes substratos.	58
<b>Figura 32:</b> Comparações da formação de biomassa total no feijoeiro em substratos com e sem adição de composto orgânico.	61
<b>Figura 33:</b> Comparações da formação de biomassa aérea no feijoeiro em substratos com e sem adição de composto orgânico.	62
<b>Figura 34:</b> Comparações da formação de biomassa de raiz no feijoeiro em substratos com e sem adição de composto orgânico.	63
<b>Figura 35:</b> Comparações da formação de biomassa total no feijoeiro em substratos com diferentes percentuais de composto.	64
<b>Figura 36:</b> Comparações da formação de biomassa aérea no feijoeiro em substratos com diferentes percentuais de composto.	65
<b>Figura 37:</b> Comparações da formação de biomassa de raiz no feijoeiro em substratos com diferentes percentuais de composto.	66

## INDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008. ....	6
<b>Tabela 2:</b> Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para o ano 2008. ....	12
<b>Tabela 3:</b> Dados das coletas realizadas. ....	30
<b>Tabela 4:</b> Proporções e massas de adubo e solo utilizados como substrato ....	32
<b>Tabela 5:</b> Perdas de massa para a 1ª e 2ª etapa de combustão e sua razão de proporção para as misturas de várias idades. ....	51
<b>Tabela 6:</b> Análise imediata em base aos dados iniciais e em base seca para as misturas de várias idades. ....	55
<b>Tabela 7:</b> Dados utilizados na análise estatística. ....	60

# 1. INTRODUÇÃO

É notório que o crescimento populacional no mundo vem acompanhado de um alto consumo tanto de produtos naturais quanto industrializados. Esse consumo excessivo, porém necessário, acarreta uma grande geração de resíduos, principalmente sólidos, que tem se mostrado um grande desafio para uma gestão ambiental sustentável na atualidade. Tal desafio se caracteriza não só pela larga geração dos resíduos em si, mas sim pela falta de uma alternativa adequada sendo logística e economicamente viável para se tratar a parcela de resíduos orgânicos produzidos.

Os tipos de resíduos gerados pela atividade humana podem ser doméstico, rural e comercial. De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) divulgado em 2012 pelo Ministério do Meio Ambiente, aproximadamente 184 mil toneladas de resíduos sólidos são produzidos por dia no Brasil. Desse total, apenas 31,9% dos materiais são recicláveis e 51,4% representam materiais orgânicos e esses dados somados à ausência de uma destinação adequada são capazes de assustar população e governo (BRASIL, 2012).

O baixo reaproveitamento e tratamento dos resíduos no Brasil é claramente perceptível, sendo assim uma problemática a ser solucionada. Os dados fornecidos em 2012 demonstram que unidades de reciclagem equivale a 1,4% do destino final, 0,8% são das unidades de compostagem e a maior parte da porcentagem totalizando um somatório em torno de 92,1% são referentes ao aterro sanitário, controlado e lixões (BRASIL, 2012).

Além das dificuldades relacionadas com o gerenciamento final dos resíduos, a grande necessidade do aumento da produção alimentícia estimula a utilização de produtos químicos, como fertilizantes e agrotóxicos, no qual segundo dados da Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação (FAO) o Brasil está posicionada na quarta posição no ranking mundial de maior consumidor. Porém, ao mesmo tempo que acarreta um aumento na produção, ao manter o controle de pragas e otimizar a produção pelo maior uso das terras, também gera muitos problemas de saúde e ao meio ambiente quando não utilizados com a devida cautela e controle (PERES; MOREIRA, 2007).

Uma solução eficiente, porém não muito explorada, é a compostagem. Essa forma de reciclagem permite eliminar metade dos obstáculos gerados pelo destino

final dos resíduos sólidos, permitindo um melhor controle da erosão do solo, da sua estrutura, evita o uso de fertilizantes sintéticos, além de reduzir o acúmulo de resíduos nos aterros. A partir da compostagem, pode ser feito o reaproveitamento da matéria orgânica, transformando-a em um fertilizante natural, sendo possível assim substituir o sintético (JUCA; CASTILHOS JUNIOR; MARIANO, 2015).

Por fim, o objetivo do trabalho é analisar o processo de compostagem feito com o foco em reaproveitar os resíduos sólidos gerados pelo Restaurante Universitário (RU) do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio de Janeiro visando produzir adubo orgânico estabilizado.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal o reaproveitamento dos restos de comida gerados pelo Restaurante Universitário do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro utilizando tratamento por compostagem visando produzir adubo orgânico estabilizado.

Como objetivos específicos temos:

- (i) Caracterização dos materiais utilizados na compostagem, ou seja, os restos de comida, folhas e suas misturas de diferentes idades pelas técnicas de: Análise Térmica, Difração de Raios-X e Análise Imediata;
- (ii) Comparação dos produtos de diferentes idades gerados no processo de compostagem, realizado pelo grupo MUDA, por Análise Térmica;
- (iii) Realização de compostagem em pequena escala utilizando bombona de 200 L e acompanhamento de sua temperatura em tempo real;
- (iv) Aplicação do adubo orgânico gerado produzido pelo grupo MUDA no cultivo de sementes de feijão;
- (vii) Avaliação estatística da biomassa gerada no feijoeiro utilizando substratos com diferentes percentuais de adubo orgânico.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1. RESÍDUOS SÓLIDOS**

O tema resíduos sólidos é bastante discutido no PNRS e na NBR ISO 10004:2004, no qual um complementa o outro. A partir do plano nacional podemos ter conhecimento sobre o cenário atual dos resíduos sólidos no Brasil, ter uma previsão de como estará a situação até o ano de 2031, sugestões de metas e estratégias para o Brasil efetuar a gestão ambiental mais adequada e possíveis ações e projetos para o gerenciamento desses resíduos sólidos (BRASIL, 2012).

Já em relação a NBR ISO 10004:2004, é uma norma que classifica os resíduos sólidos em relação aos possíveis riscos à saúde humana e ao meio ambiente para que possam ser levadas em consideração o melhor tipo de gestão.

#### **3.1.1. Definições**

A partir da norma NBR ISO 10004:2004, os resíduos sólidos ou semissólidos são gerados na área doméstica, comercial, industrial, agrícola, hospitalar, de varrição e de serviços. São aqueles que não podem de maneira alguma serem lançados em corpos de água ou na rede pública de esgotos, ou demandam da utilização de soluções economicamente inviáveis e técnicas em relação a tecnologia disponível. São exemplos de resíduos que se incluem nesse quadro, aqueles provenientes de instalações e equipamentos de controle de poluição, o resíduo gerado do tratamento de água que são os chamados lodos e por fim alguns determinados líquidos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Um conceito importante que deve ser diferenciado é em relação a diferença entre resíduo e rejeito. Segundo definição do art.3º, XV, XVI, lei no 12.305/2010 o rejeito é um resíduo sólido que não tem possibilidade de processos técnicos disponíveis e economicamente viáveis para a sua recuperação ou tratamento, não apresentando uma alternativa que não seja a disposição final adequada, no caso em aterro sanitário (CAMPOS; MELLO FILHO; CARVALHO, 2015).

Em suma, quando o resíduo sólido não é um rejeito ele pode ter uma destinação final ambientalmente adequada, a partir de uma reciclagem, compostagem, reutilização, reaproveitamento energético e diversas outras destinações. Caso o contrário, deverá ser encaminhado para o aterro sanitário.

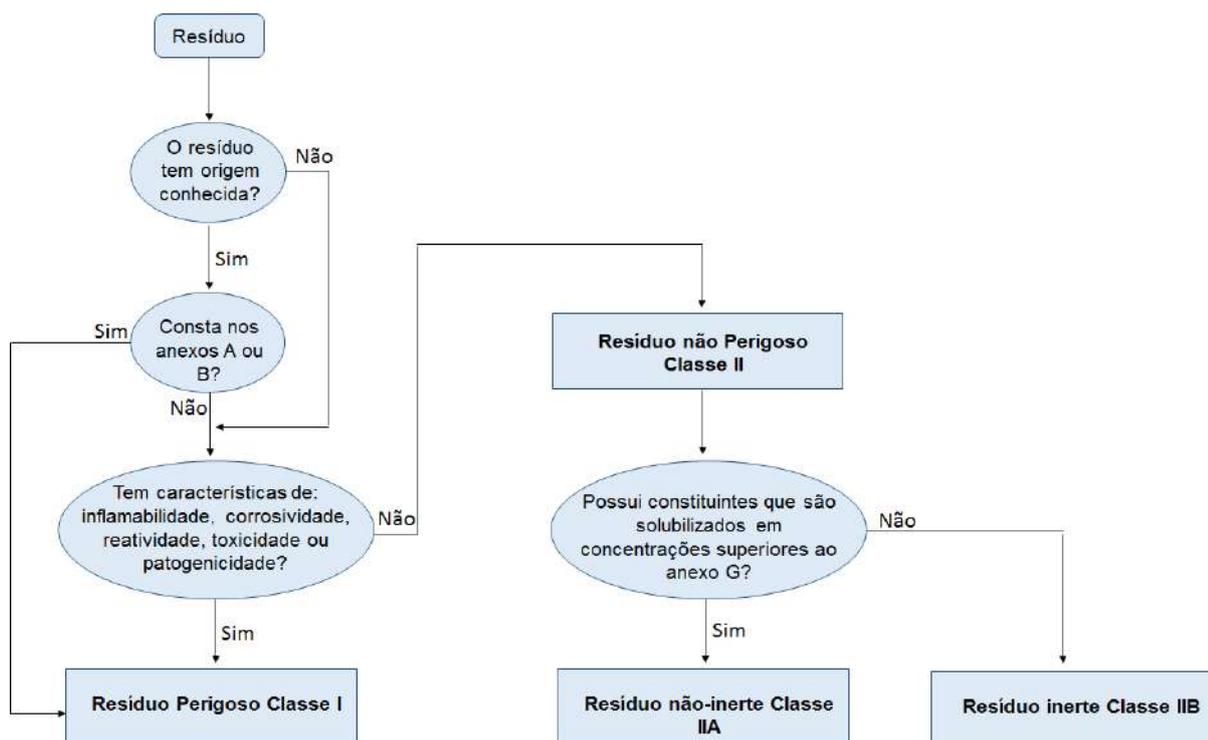
### **3.1.2. Classificações**

Os resíduos sólidos estão classificados em três tipos de classes. São eles os resíduos de classe I - perigosos e resíduos de classe II - não perigosos, que podem ser subdivididos em resíduos de classe IIA- não inertes e resíduos de classe IIB - inertes.

No caso dos resíduos de classe I - perigoso são aqueles que conforme definido no tópico 3.2 da NBR ISO 10004:2004 apresentam alguma periculosidade, que seria risco ao meio ambiente ou à saúde pública, ou alguma das características a seguir: corrosividade, toxicidade, reatividade, inflamabilidade e patogenicidade. Além disso, podem estar incluídos nessa categoria aqueles que constarem no anexo A (Resíduos Perigosos de fontes não específicas) ou no anexo B (Resíduos Perigosos de fontes específicas) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Desmembrando as subclasses dos resíduos de classe II - não perigosos, temos que a classe IIA - não inertes são os que não se enquadram nas classificações das classes I ou IIB, podendo ter propriedades como solubilidade em água, combustibilidade ou biodegradabilidade. Já em relação a classe IIB - inertes, são os resíduos que conforme o anexo G (Padrões para o ensaio de solubilização) da NBR ISO 10004:2004 não obtiveram concentrações superiores em nenhum dos seus constituintes comparados aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se cor, turbidez, sabor, dureza e aspecto.

A Figura 1 representa um esquema com o passo a passo para a caracterização e classificação dos resíduos sólidos.



**Figura 1:** Fluxograma da caracterização e classificação dos resíduos sólidos.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004).

### 3.1.3. Geração de Resíduos Sólidos

A geração dos resíduos sólidos coletados no Brasil em 2008 pode ser observada através da Tabela 1 presente no PNRS, no qual demonstra que 51,4% dos resíduos urbanos coletados é de matéria orgânica e o resto é equivalente a materiais recicláveis e outros (BRASIL,2012).

**Tabela 1:** Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008.

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (t/dia)
Material reciclável	31,9	58.527,40
Metals	2,9	5.293,50
Aço	2,3	4.213,70
Alumínio	0,6	1.079,90
Papel, papelão e tetrapak	13,1	23.997,40
Plástico total	13,5	28.847,90
Plástico filme	8,9	16.399,60
Plástico rígido	4,6	8.448,3
Vidro	2,4	4.388,60
Matéria orgânica	51,4	94.335,10
Outros	16,7	30.618,90
Total	100,0	183.481,50

Fonte: BRASIL, (2012).

No centro de tecnologia (CT) na Universidade Federal do Rio de Janeiro, campus da Ilha do Fundão, com o auxílio do projeto MUDA é colocado em prática a compostagem em larga escala nos fundos do estacionamento do bloco A do CT.

Os grandes geradores de resíduos no CT são os 9 trailers localizados no primeiro andar do corredor frontal do CT e os restaurantes Burguesão, Kilowatts, Projectus e Restaurante Universitário. Os trailers devem ter uma produção de cerca de 8 kg/dia cada. Já os restaurantes devem ter uma produção de cerca de 25 kg/dia e especificamente o restaurante universitário cerca de 400 kg/dia. Com isso, a estimativa de produção dos resíduos é de cerca de 547 kg/dia (PERTEL,2017).

O projeto completo tem o potencial de reduzir em até 58% a quantidade total dos resíduos gerados no CT, que precisam ser destinados adequadamente para fora da Cidade Universitária. Nesse projeto final, o foco vai ser exclusivamente para a prática da compostagem aplicada aos resíduos sólidos somente do restaurante universitário (PERTEL,2017).

### **3.2. TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Tratar de forma eficiente e garantir uma destinação ecologicamente vantajosa são desafios encontrados frente ao grande volume de resíduos gerados. Visando essa garantia, o PNRS estabelece uma ordem preferencial para o tipo de tratamento a ser empregado aos resíduos de maneira a aplicar a disposição de aterros sanitários apenas em caso de esgotamento das opções ambientalmente indicadas (BRASIL, 2012).

Preferencialmente, é encorajada a redução da geração de resíduos através de reeducação ambiental, mudança de comportamento e novas posturas do setor empresarial com o tema, uma vez que uma geração excessiva de resíduos caracteriza uma má gestão do processo.

Em seguida, ações como reuso e reciclagem ganham bastante suporte também, uma vez que são capazes de reduzir a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários por meio de prolongamento da vida útil do material com a aplicação ou não do mesmo à outro fim ou simplesmente efetuando uma separação eficiente para otimizar o processo de destinação, como por exemplo a coleta seletiva.

Atualmente, o reaproveitamento dos resíduos sólidos através da compostagem tem sido um assunto bastante debatido entre países desenvolvidos e em desenvolvimento quanto à sua eficiência e viabilidade econômica e conseqüentemente o seu emprego em larga escala como solução para o problema associado à grande geração de resíduos (BRASIL, 2012).

A Hierarquia de ações para gestão de resíduos sólidos está representada na pirâmide da Figura 2.



**Figura 2:** Hierarquia de ações para gestão de resíduos sólidos.

Fonte: Modificado de BRASIL, (2012).

### 3.2.1. Compostagem

#### 3.2.1.1. Definição e Histórico

A compostagem é considerada um processo natural com ocorrência espontânea e caracterizada pelo atendimento de algumas condições básicas, sendo elas: material orgânico a ser degradado, presença de microorganismos capazes de decompor determinado material, umidade e presença de ar (MASSUKADO, 2008).

A compostagem pode ser definida como um processo de decomposição de resíduos orgânicos, usualmente realizado em leiras, através do crescimento e ação de uma população de microorganismos. Estes são compostos por fungos, bactérias e archaea, os quais são críticos quanto as reações químicas de transformação da matéria orgânica durante o processo de compostagem e influenciam diretamente a qualidade do composto final (RYCKEBOER et al. 2003; SCHEUERELL; MAHAFFEE,

2002). Como produto desse processo é possível obter um material rico em matéria orgânica e nutrientes, capaz de ser empregado como adubo natural para a agricultura (ZANETTE, 2015).

Uma leira nada mais é do que o recipiente onde ocorre a compostagem, ou seja, o local onde a matéria orgânica é concentrada para que ocorra sua decomposição podendo ser de diferentes tamanhos e formatos desde que garanta uma aeração eficiente do material. Apesar das leiras terem começado a ser empregadas ainda nos primórdios da compostagem, sua utilização no presente ainda é válida mesmo que com características mais rudimentares, uma vez que por ser um tratamento simples de ser executado, a compostagem pode ser realizada desde uma escala caseira até uma escala maior.

A adubação natural do solo tem ocorrido através dos séculos, proveniente de repetidos ciclos de crescimento e decomposição de matéria orgânica, muito antes da compreensão humana sobre seu funcionamento (ZANETTE, 2015). Obviamente que uma vez que o ser humano tomou ciência deste processo ele foi capaz de estudá-lo e compreendê-lo para desenvolver formas de otimização.

Ainda na Idade Média, na Europa, era muito comum que os agricultores praticassem a aplicação de resíduos orgânicos a fim de aumentar a fertilidade e qualidade do solo, onde já associavam tal prática a preservação do meio ambiente, saúde humana e animal (PARR; HORNICK, 1992). O pioneirismo na adoção e desenvolvimento da técnica de compostagem partiu da Europa, onde todo tipo de material putrescível era estocado em pilhas ou em buracos no solo durante um período de seis meses para decomposição (GOTAAS, 1956).

Com os subseqüentes avanços tecnológicos e maior compreensão do homem sobre a natureza foi possível identificar parâmetros de ajuste do processo como a taxa de aeração para desenvolvimento adequado dos microorganismos e a utilização de culturas de bactérias específicas visando aumentar a taxa de conversão das matérias primas em adubo orgânico (SCHALCH et al., nd).

Posteriormente, fatores como temperatura, disponibilidade de nutrientes, umidade e até mesmo a composição do material a ser degradado estavam diretamente relacionados com a eficiência do processo de compostagem.

Atualmente, a compostagem possui dois grandes pilares que sustentam seu emprego com maior abrangência: reduzir a quantidade de materiais enviados a aterros sanitários e reduzir o consumo de fertilizantes.

Esse tipo de tratamento tem se mostrado uma importante ferramenta para políticas de tratamento de resíduos orgânicos devido à facilidade em se instalar e controlar o processo. Apesar disso, ainda há uma considerável resistência frente ao emprego da compostagem com maior abrangência devido à algumas desvantagens técnicas.

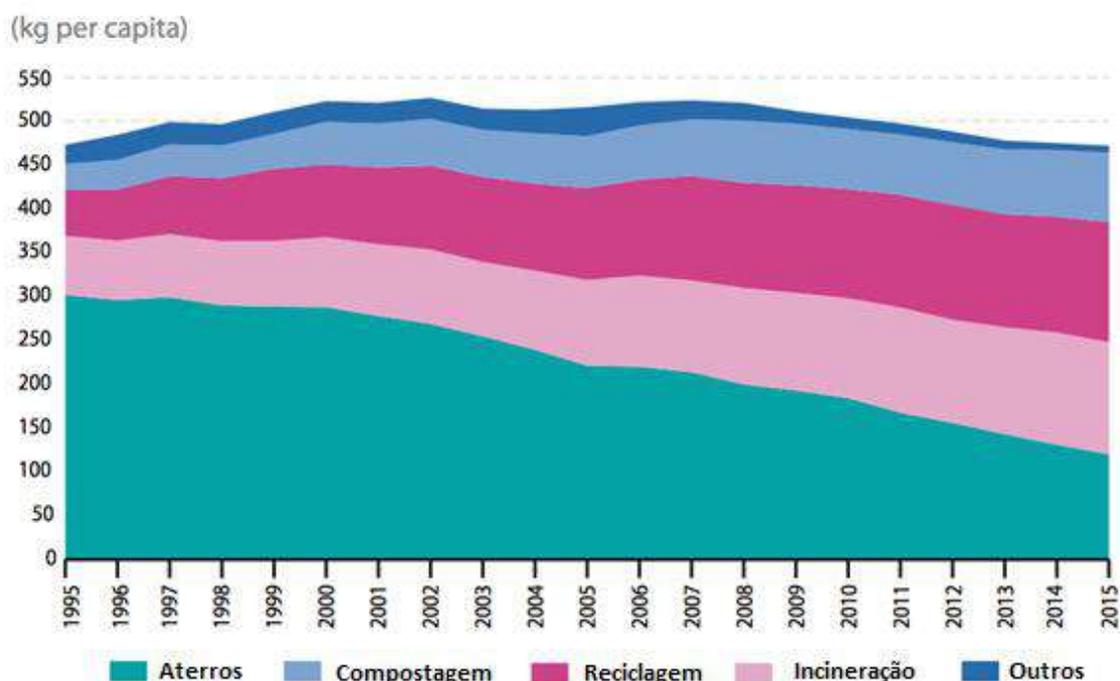
### 3.2.1.2. Compostagem no Brasil e no mundo

Atualmente, a grande concentração de projetos e áreas dedicados à compostagem estão localizados na Europa e Estados Unidos principalmente por terem sido pioneiros e grandes defensores de sua utilização. Apesar disso, nem todas as ideias e projetos conseguem ser colocados em prática rapidamente, já que diversos fatores atrapalham a implementação com grande abrangência e a obtenção de processos eficientes.

Fatores como má qualidade do resíduo orgânico utilizado, presença de metais pesados, materiais inertes, falta de experiência no tratamento, tempo de residência alto e até mesmo falta de aceitação do produto estabilizado foram determinantes como empecilhos para a prática da compostagem no passado (DE BERTOLDI, 1998).

Ainda segundo De Bertoldi (1998), o fortalecimento da coleta seletiva, modificações e adaptações dos processos tornaram a compostagem um tratamento cada vez mais empregado nessas regiões. Nos dias atuais, essas iniciativas aliadas ao grande apelo para um desenvolvimento sustentável da humanidade, têm feito a compostagem ganhar ainda mais força no cenário mundial.

Dados divulgados em 2018 pelo Eurostat (Figura 3), mostram a redução na quantidade de resíduos enviados a aterros sanitários nos últimos anos nos principais países da Europa evidenciando a mudança não só de mentalidade, mas também de cultura da população europeia. Isso se deve muito a uma melhor aceitação por parte da população, além da instalação de políticas regionais e da própria União Europeia com apelo ambiental para ajudar na disseminação de uma cultura sustentável (EUROPEAN COMMISSION, 2018).



**Figura 3:** Quantidade de resíduos tratados na EU-27 (kg per capita) por tipo de tratamento.

Fonte: Modificado de European Commission, (2018).

O grande ponto positivo observado nos dados obtidos na Eurostat é a considerável redução na quantidade de resíduos enviados a aterros sanitários saindo de 302 kg per capita em 1995 para 120 kg per capita em 2015. Esses valores representam uma redução de 58% do total de resíduos destinados ao tratamento indesejado em aterros, o que contabilizou 83 milhões de toneladas de resíduos destinados a tipos de tratamentos sustentáveis nesses 20 anos (EUROPEAN COMMISSION, 2018).

Os EUA possuem um grande potencial para prática da compostagem, porém ainda não explorado, uma vez que quase 50% dos resíduos gerados em terras norte americanas são de fração orgânica e passíveis de serem tratados por esse método.

Os estados norte-americanos tratam o assunto de forma segregada e com isso é possível notar discrepâncias na prática desse tipo de atividade de um estado para outro e muitos deles não incentivam ou não possuem sequer projetos que viabilizem a compostagem. Infelizmente, essa divergência na abordagem do assunto ainda restringe a infraestrutura de compostagem em algumas regiões onde, muitas vezes, boa parte do resíduo enviado para aterros sanitários poderiam ser tratados via compostagem (PLATT; GOLDSTEIN; COKER, 2014). Apesar disso, existem 3285

centros de compostagem nos Estados Unidos capazes de tratar 19,8 milhões de toneladas de resíduos por ano, com espaço para ainda maior exploração.

Ainda se pode notar uma maior discussão sobre o tema em escolas, indústrias e comunidades para sua difusão na cultura, além do reconhecimento por parte de seus governos da relevância do ponto de vista sustentável de se aplicar a compostagem para seus resíduos orgânicos (PLATT; GOLDSTEIN; COKER, 2014).

A situação no Brasil apresenta um grande abismo entre as iniciativas para se ter um tratamento sustentável de resíduos e o que o país é capaz de colocar em prática. Mesmo com a implementação e revisão do Plano Nacional de Resíduos Sólidos ainda há um longo caminho para que uma maior efetividade em práticas de reciclagem e compostagem possa ser observada (BRASIL, 2012).

Apesar da alta quantidade de matéria orgânica encontrada nos resíduos sólidos urbanos brasileiros, 94.335,1 t/d segundo o PNRS, a evidência do baixo direcionamento dessa matéria para unidades de compostagem pode ser observada na Tabela 2.

**Tabela 2:** Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para o ano 2008.

<b>Destino final</b>	<b>Quantidade(t/d)</b>	<b>%</b>
Aterro Sanitário	110.044,40	58,3
Aterro Controlado	36,673,20	19,4
Vazadouros a céu aberto (Lixão)	37.360,80	19,8
Unidade de Compostagem	1.519,50	0,8
Unidade de triagem para reciclagem	2.592,00	1,4
Unidade de incineração	64,80	<0,1
Vazadouros em áreas alagáveis	35,00	<0,1
Locais não fixos	SI	
Outra unidade	525,20	0,3
<b>Total</b>	<b>188.814,90</b>	

Fonte: Modificado de PNRS, (2012).

Até 2008, apenas 211 municípios brasileiros possuíam unidades de compostagem ativas que representavam o tratamento de apenas 1,6% do total estimado de resíduos orgânicos produzidos no país. Esse dado se torna ainda mais assustador, chegando a 0,8%, quando comparado com o total de resíduos sólidos urbanos gerados (BRASIL, 2012).

O sucesso do Plano Nacional de Resíduos Sólidos demanda além de investimento em diversos setores, uma mudança de postura e maior conscientização

de toda a sociedade quanto a severidade tema. Dessa forma, as práticas defendidas pelo Plano ganhariam mais apoio e mobilização para que objetivos de desenvolvimento socioeconômico, preservação ambiental e da inclusão social fossem alcançados.

Com o intuito de atender suas diretrizes e atingir suas metas, o PNRS conta com a Educação Ambiental marcada pela Lei 9795, da Política Nacional de Educação Ambiental, estabelecida em 27 de abril de 1999, para disseminar a informação e sensibilizar tanto população quanto profissionais da área sobre a relevância do assunto. Esta considera “educação ambiental” como:

“os processos por meio dos quais o indivíduo e a coletividade constroem valores sociais, conhecimentos, habilidades, atitudes e competências voltadas para a conservação do meio ambiente, bem de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida e sua sustentabilidade (BRASIL,2012)”

De fato, a iniciativa existe, porém fatores como a ineficiência dos serviços de coleta e separação de resíduos dificultam muito a difusão dessas práticas no Brasil, onde mais da metade dos resíduos sólidos gerados são destinados a aterros sanitários sem passar por nenhum tipo de avaliação ou tratamento prévio.

Além disso, em um país onde a agricultura tem papel fundamental no desenvolvimento país, a compostagem é uma alternativa para abastecê-la sem impactar o meio ambiente e a saúde, porém sua desvantagem está relacionada com os baixos níveis de produtividade dessa técnica em relação aos altos níveis alcançados pela aplicação de agrotóxicos e fertilizantes.

Apesar da prática de utilização de agrotóxicos e fertilizantes ainda ser dominante nos dias atuais, quando colocados em pauta os aspectos positivos e negativos de cada método é inevitável que ocorra uma comparação. Ao passo que, o uso de agrotóxicos sofre muitas críticas devido aos seus impactos a saúde e ambientais, a compostagem ganha força com a conscientização da população. Porém, essa competição pode ser afetada no Brasil com a aprovação das leis nº 6.299/02 e 4576/2016, dificultando assim a conquista da compostagem por um espaço expressivo.

O Projeto de Lei de Defensivos Fitossanitários (PL 6.299/02), que se encontra em fase final de análise antes de seguir para plenário na Câmara, propõe mudanças significativas na regulamentação e comercialização de agrotóxicos no Brasil. Dentre

essas mudanças está a substituição do termo agrotóxico, instituído na lei nº 7.802/89, por “defensivos fitossanitários” que pode ser considerada uma tentativa de mascarar o caráter nocivo desse tipo de produto em apoio a interesses ruralistas em detrimento aos da população que tem demonstrado maior conscientização e rejeição a esses produtos. Outra mudança impactante é a centralização do processo de análise e registro desses produtos para atribuições apenas do Ministério da Agricultura o que retiraria a participação da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e do IBAMA na identificação de possíveis danos para o meio ambiente, saúde dos brasileiros e comprovação de eficácia dos produtos, tornando esses órgãos apenas consultores. Além disso, o projeto prevê o emprego de termos genéricos na descrição dos produtos a fim de ocultar a presença e facilitar o registro de substâncias mutagênicas, carcinogênicas e teratogênicas que até então deveriam ser expressamente identificadas e proibidas.

Já em relação a lei nº 4576/2016 indica uma mudança na proposta de lei nº 10831/03, na qual considerava a utilização do sistema orgânico de produção agropecuária conforme o item abaixo art. 1º.

“Considera-se sistema orgânico de produção agropecuária todo aquele em que se adotam técnicas específicas, mediante a otimização do uso dos recursos naturais e socioeconômicos disponíveis e o respeito à integridade cultural das comunidades rurais, tendo por objetivo a sustentabilidade econômica e ecológica, a maximização dos benefícios sociais, a minimização da dependência de energia não-renovável, empregando, sempre que possível, métodos culturais, biológicos e mecânicos, em contraposição ao uso de materiais sintéticos, a eliminação do uso de organismos geneticamente modificados e radiações ionizantes, em qualquer fase do processo de produção, processamento, armazenamento, distribuição e comercialização, e a proteção do meio ambiente (Lei nº 10831/03). “

Com a possível aprovação do novo projeto de lei nº 4576/2016 ocorrerá mudanças relacionadas a comercialização direta dos produtos orgânicos aos consumidores. Com isso, essa comercialização deverá ser realizada somente por agricultores familiares cadastrados no órgão da Administração Pública Federal responsável por assuntos concernentes à produção agropecuária, e em feiras livres ou propriedades particulares com a fiscalização sistemática adequada.

No contexto brasileiro onde o consumo desses produtos torna-se cada vez maior, a aprovação de projetos de lei com tais aspectos é realmente preocupante, uma vez que facilitaria a produção, registro e comercialização de agrotóxicos sem grande controle regulamentador.

Além de tudo, esses projetos vão em total contramão dos interesses e preocupação mundiais com meio ambiente e saúde. Eles iriam prejudicar e enfraquecer práticas orgânicas como a compostagem, colocar a saúde e proteção do consumidor em risco, manter e possivelmente até agravar o atual desgaste do meio ambiente ligado a práticas agrícolas.

### 3.2.1.3. Principais fatores que influenciam a compostagem

A seguir serão descritos os principais fatores que afetam um processo de compostagem.

#### a) Razão Carbono/Nitrogênio (C/N)

A disponibilidade por oxigênio e nitrogênio exercem grande influência na respiração e atividade biológica durante a compostagem, portanto, influenciam na termorregulação do composto e na sucessão microbiana (GUO et al., 2012).

A obtenção de uma compostagem eficiente requer uma proporção adequada entre os elementos carbono e nitrogênio presentes nos materiais orgânicos. A maioria dos materiais lignocelulósicos, como madeira e grama secas, é rica em carbono, mas contém pouco ou nenhum nitrogênio ligado. Assim, é uma prática comum adicionar biomassa baseada em vegetais em uma proporção otimizada quando se deseja compostar produtos residuais ricos em nitrogênio, como por exemplo restos de comida ou esterco.

A redução da quantidade de carbono no decorrer da compostagem pode ser associada a degradação de celulose e hemicelulose. Vários pesquisadores forneceram detalhes adicionais de como a razão C:N tipicamente diminui durante a compostagem, de tal forma que a razão frequentemente tem sido usada como uma indicação da maturidade relativa do composto (KAUSAR et al. 2010; HACHICHA et al. 2012 RAZALI et al., 2012; CHENG et al., 2011; PARADELO; MOLDES; BARRAL, 2013; THOMAS et al., 2013).

#### b) Aeração

Fornecer estruturas e canais para aeração permite um maior controle sobre a razão C:N, através da adição de materiais à base de plantas na compostagem (HUBBE et al., 2010; ZHAO et al., 2011a, b) . Garantir a presença de oxigênio através da pilha de compostagem, é essencial para minimizar a possibilidade de formação de pequenas regiões anaeróbias (LUZ CAYUELA et al., 2012). A compostagem convencional é essencialmente um processo aeróbico, e a mínima presença de oxigênio é necessária para evitar odores desagradáveis e condições tóxicas.

#### c) Umidade

O teor de umidade de uma unidade de compostagem exerce influência na atividade e dinâmica microbiana. Manter uma umidade adequada para o processo é importante sendo que: (i) no caso de meio seco, a atividade biológica diminui; (ii) no caso de meio muito úmido, as condições podem se tornar anaeróbias, gerando gases como metano e amônia.

Recomenda-se um teor de umidade na faixa de 50-75% (GUO et al., 2012). Conforme documentado por KARADAG et al., (2013), pode-se esperar que o teor de umidade diminua durante o curso da compostagem. Esse efeito é consistente com a elevação das temperaturas durante a compostagem, bem como a convecção do ar (HUBBE et al., 2010).

### 3.2.1.4. Fases do processo de compostagem

O processo de compostagem é caracterizado por ter quatro fases distintas: mesofílica, termofílica, mesofílica intermediária e maturação.

Durante a prévia fase inicial mesofílica, os materiais orgânicos começam a aumentar de temperatura devido a atividade biológica e podem alcançar temperaturas de até 40°C. Na segunda fase, chamada de termofílica, as temperaturas podem ultrapassar o patamar de 65°C por um longo período de tempo, sendo uma fase crítica no que se refere a eliminação de patógenos e sementes de ervas de outras variedades de plantas (MEHTA et al., 2013).

Durante a terceira fase, também chamada de mesofílica intermediária ou de resfriamento, as temperaturas atingem faixa abaixo de 50°C e na última fase,

chamada de fase de maturação, a matéria orgânica e o calor devido a atividade biológica se estabilizam, resultando em um substrato humificado e escuro, o qual eventualmente permanece na temperatura ambiente (MEHTA et al., 2013).

### 3.2.1.5. Tipos de compostagem

Da mesma forma que processos de decomposição de matéria orgânica podem acontecer na presença ou ausência de oxigênio, uma compostagem pode ser classificada como aeróbia ou anaeróbia. Essa classificação está diretamente atrelada ao tipo de microorganismo que irá se desenvolver no meio em questão, dependendo da disponibilidade ou não de ar.

Em um cenário anaeróbio, a velocidade de decomposição de matéria orgânica é baixa, ocorre a produção de odores desagradáveis oriundos de gases contendo enxofre liberados no crescimento dos microrganismos anaeróbios, além de uma oxidação incompleta dos compostos presentes (ROSSI, 2015). Tais características do processo anaeróbio são consideradas grandes desvantagens e corroboram com a utilização do processo aeróbio para o tratamento de resíduos orgânicos, garantindo uma compostagem mais eficiente e ambientalmente adequada.

A presença de oxigênio possibilita uma maior velocidade de decomposição e altas temperaturas, os quais garantem um menor tempo de residência na leira e a oxidação parcial dos materiais orgânicos, respectivamente. Esses fatores tornam o processo mais eficiente (ROSSI, 2015).

Como visto anteriormente, a presença de oxigênio no processo de compostagem exerce grande influência na taxa de crescimento microbiano necessário para uma decomposição satisfatória da matéria orgânica. Baseando-se nisso, o tratamento via compostagem aerada pode ser classificado em dois tipos: compostagem por aeração passiva ou forçada.

A compostagem por aeração passiva caracteriza-se por ser um processo que ocorre naturalmente sem nenhuma ou considerável influência externa. Segundo ZANETTE (2015), muitas vezes a estrutura da leira auxilia para que a aeração natural seja a melhor possível, conferindo maior capacidade de circulação de oxigênio pelo material, facilitando o crescimento dos microrganismos que terão maior disponibilidade de ar.

Mesmo que o processo de compostagem aerada mostre ser uma melhor alternativa que o processo anaeróbico para tratamento de resíduos orgânicos, ele ainda assim demanda um tempo consideravelmente alto para apresentar um produto final com características adequadas para a aplicação como adubo orgânico e um largo espaço físico para execução (SILVA; ANDREOLI, 2010).

Visando uma otimização do processo, técnicas de aeração forçada como a injeção e difusão de ar começaram a ser empregadas na compostagem e apresentaram resultados satisfatórios principalmente por comprovar a aceleração da decomposição (SILVA; ANDREOLI, 2010).

### 3.3.1.6. Principais constituintes da compostagem

A compostagem depende diretamente do uso de materiais vegetais, ou seja, da biomassa lignocelulósica. O termo “lignocelulose” denota material derivado do crescimento fotossintético de plantas, levando ao acúmulo de paredes celulares. As paredes celulares das plantas são compostas principalmente por dois tipos de produtos químicos, sendo eles: a lignina e os polissacarídeos (carboidratos).

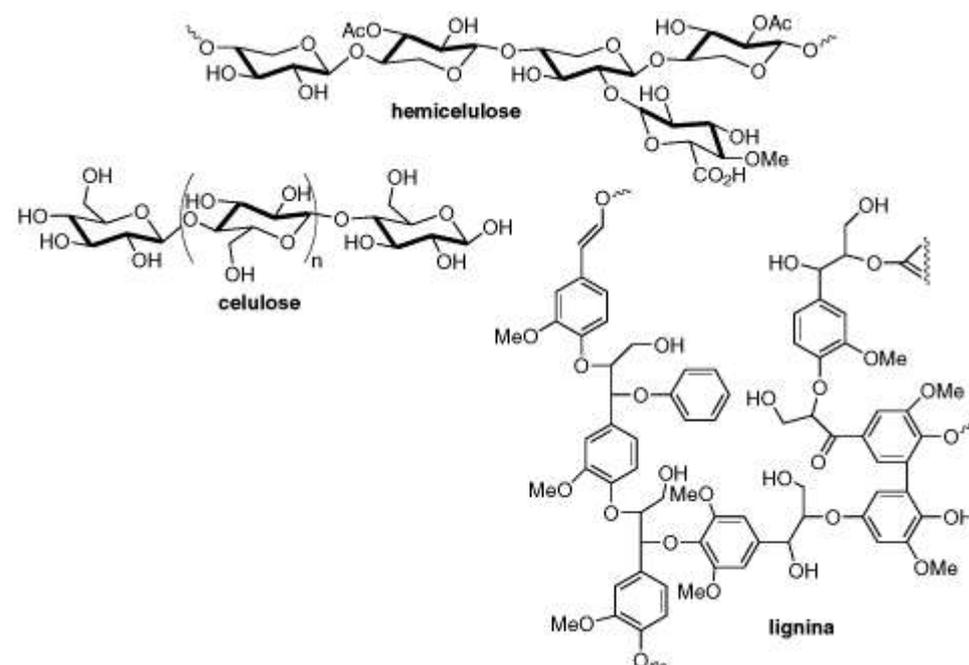
Os polissacarídeos presentes são a celulose e hemicelulose, que são polímeros compostos de unidades de açúcar no qual são utilizados como fonte principal de energia que alimenta o processo de compostagem. Estes constituintes químicos, de menor complexidade na biomassa, são completamente decompostos durante a compostagem convencional.

Em relação a lignina, é um material polimérico fenólico, que passa a ser a principal fonte de energia a partir do momento que os polissacarídeos são degradados, transformando-se quimicamente em húmus (HUBBE et al. 2010; HACHICHA et al. 2012). O húmus é um componente de composto estabilizado (material orgânico em diversos estados de decomposição) que retém a umidade e os minerais, aumentando a qualidade dos solos.

Como a maioria dos processos de compostagem ocorre na ausência de luz, a energia necessária para o desenvolvimento de vida em seu interior não pode vir diretamente da fotossíntese. Em vez disso, as bactérias e fungos dentro de uma pilha de compostagem consomem principalmente a energia dos açúcares armazenados dentro da celulose e hemicelulose. Enquanto isso, e especialmente nos últimos

estágios da compostagem, a lignina é quimicamente transformada por ação enzimática adicional (HUANG et al. 2010; HE et al. 2013).

Em geral, os estudos confirmam a extensa perda de celulose e hemicelulose, confirmando a crescente proporção de húmus (CARICASOLE et al., 2011; ZHAO et al., 2011a, b; BIKOVENS et al., 2012; HACHICHA et al. 2012, LUZ CAYUELA et al. 2012, WANG et al 2012a, BERNABÉ et al 2013, HE et al 2013, IWAI et al 2013, PARADELO; MOLDES; BARRAL, 2013). A Figura 4 apresenta a estrutura química da hemicelulose, celulose e lignina.



**Figura 4:** Estrutura química da celulose, hemicelulose e lignina.

Fonte: Modificado de FERREIRA, V.F.; ROCHA, D. R.; SILVA, F. C., (2009).

### 3.3. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

#### 3.3.1. Análise Térmica

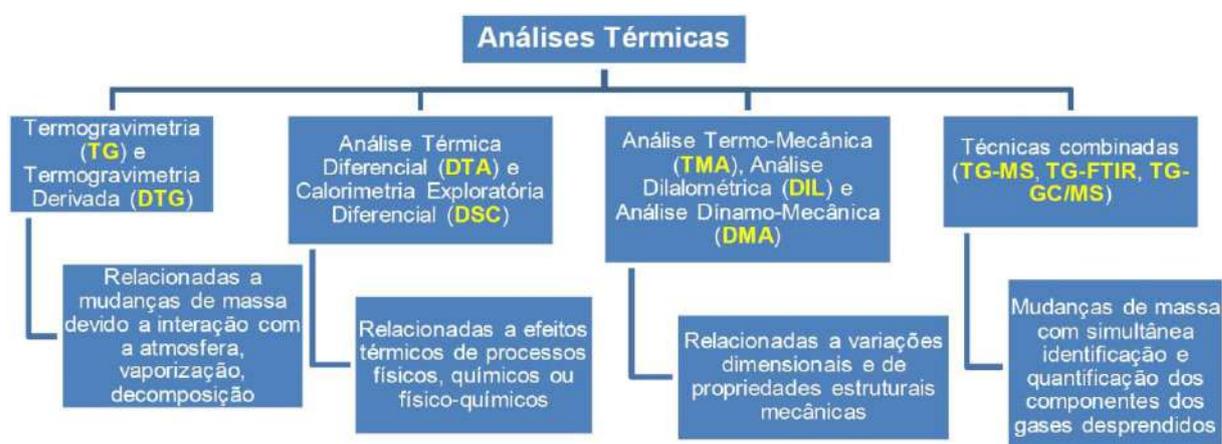
O termo análise térmica abrange um grupo de técnicas, através das quais uma propriedade de uma substância e ou de seus produtos de reação é medida em função da temperatura, enquanto a substância é submetida a uma programação controlada de temperatura (ABRATEC, 2012).

Embora a termodinâmica e as técnicas de medição de temperatura já estivessem estabelecidas desde a metade do século XIX, a análise térmica evoluiu lentamente. Os primeiros trabalhos foram resultados de esforços isolados de pesquisadores que utilizavam protótipos por eles mesmos construídos. Mundialmente os primeiros equipamentos que foram comercializados datam dos anos 60, e no Brasil, o primeiro trabalho publicado foi na área de metalurgia em 1947 (DWECK, 2010).

Nos dias atuais a instrumentação analítica atingiu elevadíssimo grau de sofisticação e popularizou-se em função de aplicações práticas crescentes. O desenvolvimento da instrumentação termoanalítica vem se caracterizando pela combinação de métodos térmicos com outras técnicas como, por exemplo: difração de raios-X, espectroscopia no infravermelho, cromatografia em fase gasosa e espectrometria de massa.

A análise térmica tem seu campo de atuação muito amplo, sendo utilizada em estudos como os de estabilidade e decomposição térmica, catálise, corrosão de metais, transições vítreas e cristalinas, determinação de entalpia, determinação de pureza, cinética de reação, adsorção/dessorção, desidratação, propriedades térmicas e mecânicas como expansão, amolecimento, diagramas de fase etc.

Essas técnicas também podem ser utilizadas para estudo de diversos materiais como os orgânicos, inorgânicos, argilas, farmacêuticos, solos, metais, sabões, carvões, combustíveis, alimentos, petroquímicos, materiais de construção, polímeros, resíduos em geral, etc. Algumas das principais técnicas termoanalíticas estão resumidas na Figura 5.



**Figura 5:** Principais técnicas termoanalíticas.

Fonte: VIANA, (2013).

Neste estudo serão utilizadas as técnicas de Termogravimetria (TG), Termogravimetria Derivada (DTG), Análise Térmica Diferencial (DTA) e Termogravimetria Acoplada a Espectrometria de Massas (TG-MS), as quais serão descritas detalhadamente a seguir.

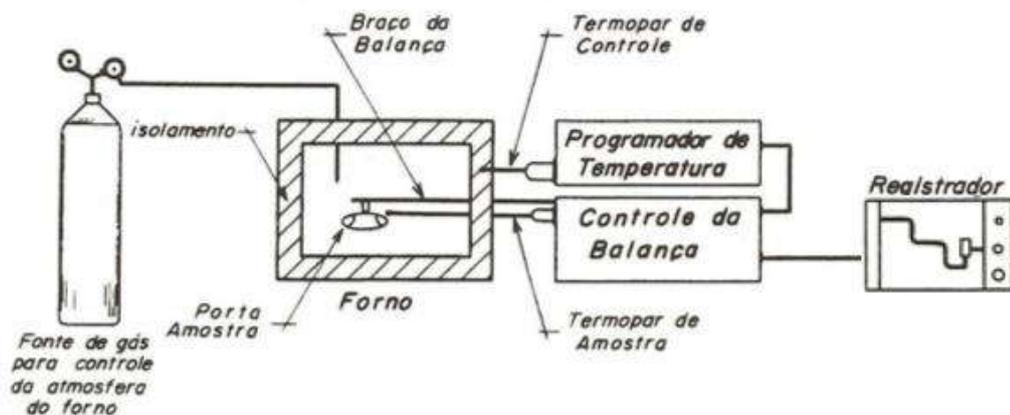
### 3.3.1.1. Termogravimetria (TG) e Termogravimetria Derivada (DTG)

A termogravimetria é uma técnica na qual a massa de uma substância é medida em função da temperatura ou tempo, enquanto a substância é submetida a uma programação controlada de temperatura. Segundo IONASHIRO et al. (2014), dependendo da maneira na qual a temperatura é controlada, a análise térmica pode ser classificada em:

- Isotérmica: aquela na qual a temperatura ( $T$ ) é constante;
- Dinâmica: aquela onde a temperatura varia com tempo ( $t$ ) de acordo com uma razão de aquecimento ( $\beta$ ). Nesse caso temos:  $T = T_0 + \beta.t$ , onde  $T_0$  é a temperatura inicial da análise;
- Modulada: esse tipo é uma variação especial do modo dinâmico na qual a variação da temperatura com o tempo é caracterizada por uma frequência ( $w$ ) e uma amplitude ( $A$ ). Neste caso:  $T = T_0 + \beta.t + A.\text{sen}(wt)$ .

Os componentes fundamentais dos equipamentos modernos de análise térmica são: balança, forno, suporte para a amostra, sensor de temperatura, programador de temperatura do forno, sistema registrador e controle da atmosfera do forno.

A balança é a parte mais importante para o sistema TG/DTG. Ela permite o registro contínuo da massa de amostra ainda presente. As balanças mais modernas possuem pequena influência da vibração, tem alta sensibilidade e pequena flutuação térmica, conforme demonstrado na Figura 6.



**Figura 6:** Esquematização de um equipamento utilizado para análise térmica.

Fonte: DENARI; CAVALHEIRO, (2012).

O programador de temperatura controla a razão de aquecimento ( $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ ) do forno. Como em análise térmica, em geral, emprega-se aquecimento a razão constante, o programador deve ser capaz de realizar uma programação linear. O controle de atmosfera permite modificar o gás que circunda a amostra, permitindo que se trabalhe com atmosferas estáticas ou dinâmicas em vazões específicas ( $\text{mL min}^{-1}$ ) determinadas pelo usuário.

Os sistemas registradores utilizados atualmente são através de computadores os quais fazem aquisição e salvam os dados das análises. O registro é a curva TG ou termogravimétrica, onde no eixo das ordenadas é apresentada a massa percentual (%) e no eixo das abcissas a temperatura ou tempo. A curva TG mostra apenas transformações com variação de massa, e permite obter dados que podem ser utilizados em análises quantitativas.

Na termogravimetria derivada (DTG), a derivada da curva TG em relação ao tempo ( $\text{dm}/\text{dt}$ ) é registrada em função da temperatura ou tempo. São obtidas curvas que correspondem à derivada primeira da curva TG, nas quais existem picos que delimitam áreas proporcionais às alterações de massa sofrida pela amostra. Esses picos auxiliam na identificação de cada etapa de perda de massa (IONASHIRO et al., 2014).

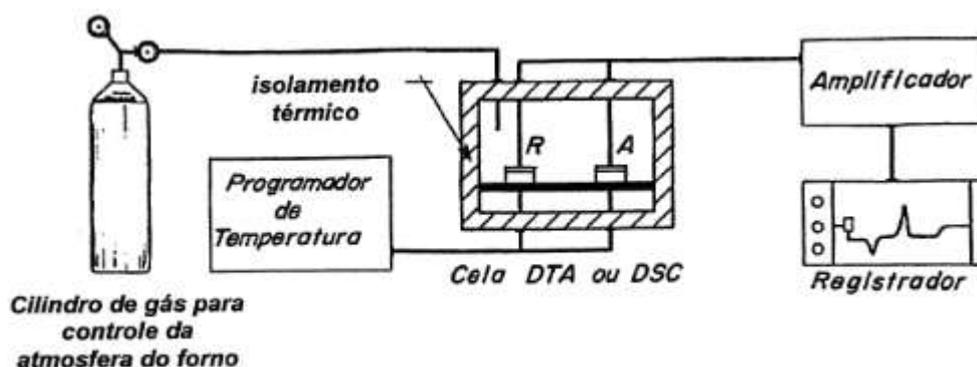
As curvas DTG auxiliam na indicação com exatidão das temperaturas que correspondem ao início e fim de cada transformação e o instante onde a velocidade de reação é máxima. Os picos DTG permitem identificar as sucessões de reações às quais, muitas das vezes, não são facilmente visualizáveis pelas curvas TG.

### 3.3.1.2. Análise Térmica Diferencial (DTA)

A Análise Térmica Diferencial (DTA) consiste no acompanhamento da diferença de temperatura entre a amostra analisada e um material de referência termicamente inerte sob um regime de aquecimento programado (DENARI; CAVALHEIRO, 2012).

Essa técnica é interessante, pois permite a identificação de fenômenos físicos ou químicos do material analisado já que tanto a amostra quanto o material de referência são submetidos ao mesmo regime de temperatura e atmosfera conforme o esquema apresentado na Figura 7.

Conseqüentemente, se espera que as temperaturas e taxa de aquecimento de ambas sejam iguais, porém fenômenos de alterações físicas e químicas na amostra, devido ao aumento de temperatura, causam variações na diferença entre elas (DARÉ, 2013).



**Figura 7:** Esquema do equipamento utilizado para análise DTA.

Fonte: DARÉ, (2013).

Uma vez que a energia fornecida pelo aquecimento do forno é suficiente para ativar alguma reação na amostra, a temperatura medida na mesma passará a ser maior ou menor que a da referência que se manterá constante.

No caso da reação envolvida ser do tipo exotérmica, será indicada uma temperatura maior na amostra do que na referência, devido ao fato de esse tipo de reação liberar calor. Em contrapartida, a ocorrência de uma reação endotérmica implicará em uma temperatura menor na amostra em comparação com a observada na referência, já que esse tipo de reação consome calor (DARÉ, 2013).

Justamente pelo fato da amostra analisada estar suscetível a ocorrência de reações com o aumento de temperatura é que essa técnica trabalha com a diferença

entre as temperaturas da amostra e de um referencial, a qual indicará através de picos (endotérmicos ou exotérmicos) a presença dessas reações.

### 3.3.1.3. Aplicação da Análise Térmica em compostagem

Vários parâmetros, baseados em métodos químicos, bioquímicos e físico-químicos, foram propostos visando avaliar o grau de maturação e estabilização em compostos orgânicos derivados da compostagem, uma vez que o grau de maturidade é difícil de ser definido com apenas um parâmetro (DELL'ABATE; BENEDETTI; SEQUI, 2000).

Dada a complexidade dos eventos biológicos, os muitos fatores interferentes e a heterogeneidade no composto, não é de surpreender que os resultados sejam frequentemente contraditórios. Nesse contexto, é difícil construir uma teoria geral e completa para a evolução da matéria orgânica durante a compostagem e surge a necessidade de se obter novos dados científicos (PIETRO; PAOLA, 2004).

Até então alguns métodos já foram propostos, em particular alguns que utilizam parâmetros químicos baseados na medição da formação de compostos húmicos, os quais requerem procedimentos de extração e fracionamento, que demandam bastante tempo de análise. A possibilidade de utilizar técnicas analíticas, as quais são aplicáveis a amostras sem pré-tratamento em análises de curta duração, é, portanto, de grande interesse (DELL'ABATE; BENEDETTI; SEQUI, 2000).

Nesse contexto, técnicas termoanalíticas como a Termogravimetria (TG), Termogravimetria Derivada (DTG), Análise Térmica Diferencial (DTA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) podem ser utilizadas para avaliar a maturidade de compostos orgânicos, uma vez que os substratos lignocelulósicos de ocorrência natural analisados por análise térmica apresentaram características típicas.

MARHUENDA-EGEA et al. (2007) desenvolveram um trabalho onde aplicaram análises TG, DTG e DTA para determinar a estabilidade térmica de compostos elaborados com resíduos da indústria do vinho e obtiveram como resultados a acentuação dos picos DTG e DTA em altas temperaturas acima de 400°C, conforme o aumento da idade dos compostos. Isso ocorreu em função do aumento da concentração de moléculas estáveis e de maior dificuldade de degradação.

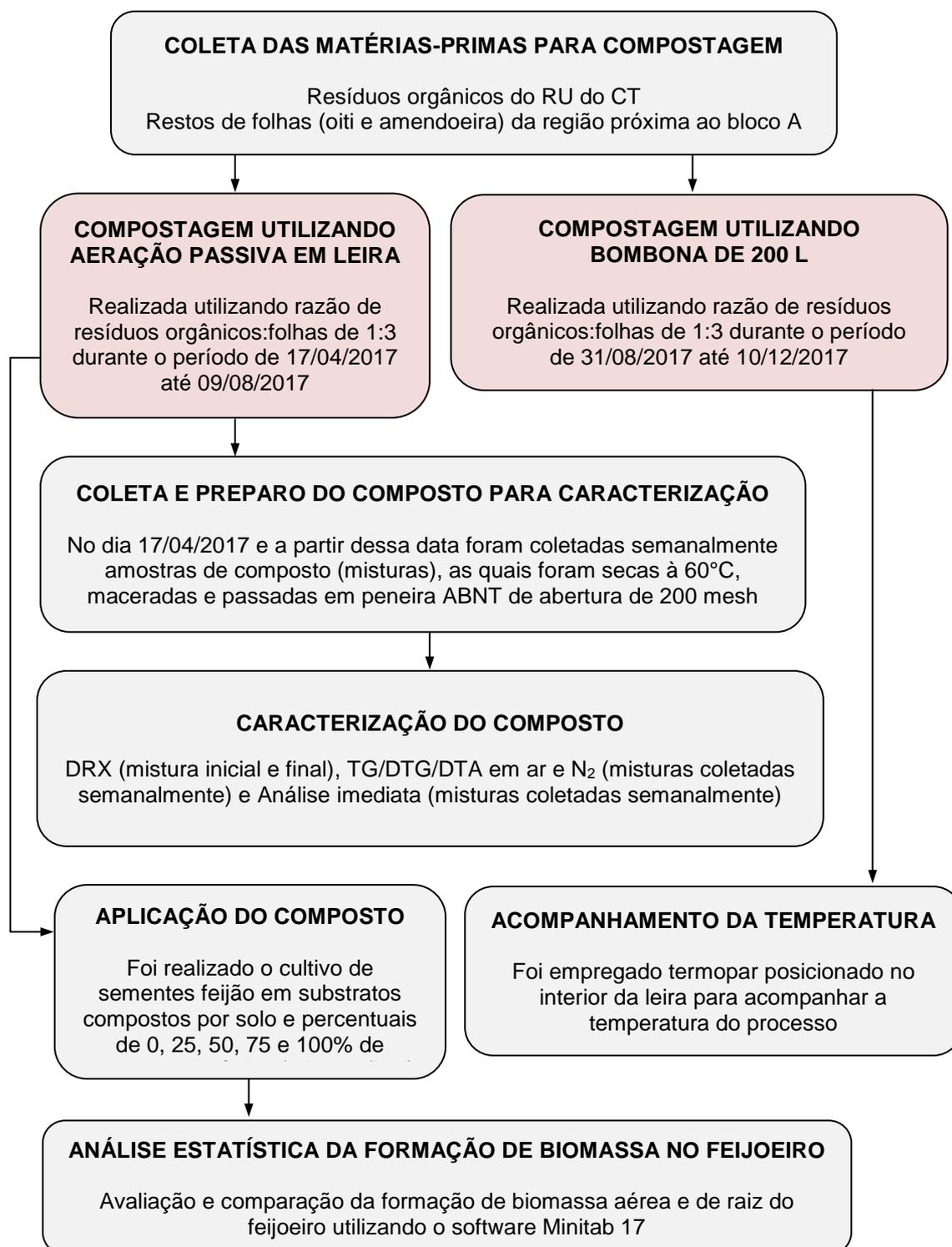
DELL'ABATTE; BENEDETTI; SEQUI (2000) estudaram a compostagem de resíduos agrícolas como frutas e cereais utilizando TG e Calorimetria Exploratória

Diferencial (DSC) e observaram o aumento de materiais mais estáveis, os quais se decompõem em maior temperatura, conforme o aumento da idade de compostagem.

PIETRO; PAOLA (2004) investigaram por TG e DTG a compostagem de resíduos sólidos municipais com resíduos vegetais e verificaram que o aumento do tempo de compostagem proporcionou a diminuição na concentração de carboidratos (hemicelulose e celulose), os quais tenderam a desaparecer no composto orgânico, e, de modo contrário, a concentração de constituintes aromáticos (lignina).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 8 é apresentado um fluxograma resumido das atividades realizadas.



**Figura 8:** Fluxograma resumido das atividades realizadas.

Além das atividades expostas no fluxograma foram realizadas outras como a caracterização do solo por DRX e a análise térmica do composto orgânico coletado após 316 dias de compostagem na bombona de 200 L, visto que após o acompanhamento da temperatura na mesma, não finalizamos o processo.

#### 4.1. COMPOSTAGEM UTILIZANDO AERAÇÃO PASSIVA EM LEIRA

Esse trabalho foi realizado na Universidade Federal do Rio de Janeiro no Centro de Tecnologia, localizado na Cidade Universitária do Campus da Ilha do Fundão. O tratamento via compostagem é uma iniciativa do projeto Composta CT, realizado pelo grupo MUDA (Figura 9), composto por alunos voluntários da UFRJ, visando o reaproveitamento dos resíduos gerados pelo RU do CT como insumo para o processo de compostagem e geração de adubo orgânico.



**Figura 9:** Placa do Projeto MUDA localizada no estacionamento do bloco A do CT.

O espaço dedicado ao projeto fica localizado no estacionamento do bloco A do CT, onde ocorre periodicamente a montagem de novas leiras de compostagem, assim como o recolhimento do produto final. Visando uma maior integração e compreensão sobre o processo foi feita uma parceria onde os integrantes deste trabalho puderam

participar de todas as etapas, desde a montagem até o recolhimento do produto final, da leira número 2.

Essa leira foi montada com as dimensões de 1m<sup>3</sup>, na qual foram utilizados os seguintes materiais: paletes de madeira, folhas de oiti (*Licania tomentosa*), folhas de amendoeira (*Terminalia catappa*), gravetos, resíduos orgânicos do RU, pá de metal, balança e sacos plásticos.

Os paletes de madeira foram organizados de forma a compor um recipiente cúbico. Os resíduos orgânicos foram cedidos pelo RU e coletados dia 17/04/2017 utilizando os sacos plásticos para posterior pesagem, garantindo a massa necessária para o preparo da mistura na proporção resíduo:folha de oiti de 1:3. Todas as folhas utilizadas foram coletadas no próprio campus da universidade e em posse de todos os materiais necessários foi possível preparar a mistura, conforme a Figura 10.



**Figura 10:** Preparo da mistura de resíduos orgânicos e folha.

Após o preparo da mistura foi feita adição da mesma no centro da leira que foi forrada previamente com uma camada inicial de aproximadamente 20 cm de graveto, seguida de 20 cm de folha de oiti no fundo e, a medida que a mistura era depositada, nas laterais. Na parte superior utilizaram-se folhas de amendoeira e o resultado final pode ser observado na Figura 11.



**Figura 11:** Leira 2 após sua montagem.

Foram feitas coletas iniciais de resíduos orgânicos, folhas e da mistura preparada para posterior análise em laboratório. A coletas foram realizadas diretamente do centro da leira, cavando-se um pouco a partir da superfície até atingir profundidade suficiente para coleta de material decomposto em quantidade necessária para as análises futuras.

Essas coletas foram realizadas semanalmente durante um período de 114 dias visando o acompanhamento do processo de decomposição. A partir da Tabela 3 é possível observar as datas de todas as coletas realizadas, bem como o material coletado.

**Tabela 3:** Dados das coletas realizadas.

<b>Identificação da coleta</b>	<b>Data</b>	<b>Tempo de compostagem (dias)</b>	<b>Material coletado</b>
1	17/04/2017	0	Resíduo orgânico Folha Mistura Inicial
2	18/04/2017	1	Mistura
3	19/04/2017	2	Mistura
4	25/04/2017	8	Mistura
5	02/05/2017	15	Mistura
6	09/05/2017	22	Mistura
7	17/05/2017	30	Mistura
8	23/05/2017	36	Mistura
9	30/05/2017	43	Mistura
10	06/06/2017	50	Mistura
11	13/06/2017	57	Mistura
12	20/06/2017	64	Mistura
13	27/06/2017	71	Mistura
14	04/07/2017	78	Mistura
15	11/07/2017	85	Mistura
16	18/07/2017	92	Mistura
17	25/07/2017	99	Mistura
18	01/08/2017	106	Mistura
19	09/08/2017	114	Mistura final

A partir da coleta de quantidade suficiente de cada material foi possível caracterizá-los após etapa prévia de preparação.

## 4.2. COMPOSTAGEM EM BOMBONA DE 200 LITROS

Visando a reprodutibilidade do processo de compostagem realizado no item anterior, além do acompanhamento sobre as variações de temperatura do processo, foi realizada uma compostagem em menor escala no Laboratório de Análise Térmica da Escola de Química da UFRJ.

Conforme a Figura 12, o recipiente utilizado foi uma bombona de 200 L, na qual foram feitas aberturas para garantir o processo de aeração em seu interior. Os materiais utilizados no preparo da leira, ou seja, as folhas, restos de comida e gravetos, tiveram a mesma procedência daqueles da leira do projeto MUDA. A mistura foi preparada utilizando as mesmas proporções usadas anteriormente, sendo alterada apenas a quantidade de material usado.

Para o acompanhamento da temperatura no processo de compostagem foram empregados dois termopares com resolução de  $0,03^{\circ}\text{C}$ , acoplados a uma interface analógico-digital da Vernier LabPro<sup>®</sup>. O primeiro termopar foi posicionado na parte superficial para medir a temperatura ambiente e o outro no interior da massa de resíduos dentro da bomba, para acompanhar a temperatura do processo dentre os dias 31/08/2017 até 10/12/2017. O esquema final é apresentado na Figura 12.



**Figura 12:** Montagem da compostagem com bombona de 200L.

### 4.3. APLICAÇÃO DO ADUBO ORGÂNICO

Com a finalidade de se evidenciar na prática a aplicação do composto orgânico produzido ao final do processo de compostagem, foi feito o cultivo de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris*) em substratos que continham diferentes proporções de solo e composto, conforme a Tabela 4, os quais foram colocados em compartimentos separados em uma fôrma de plástico (Figura 13).

**Tabela 4:** Proporções e massas de adubo e solo utilizados como substrato

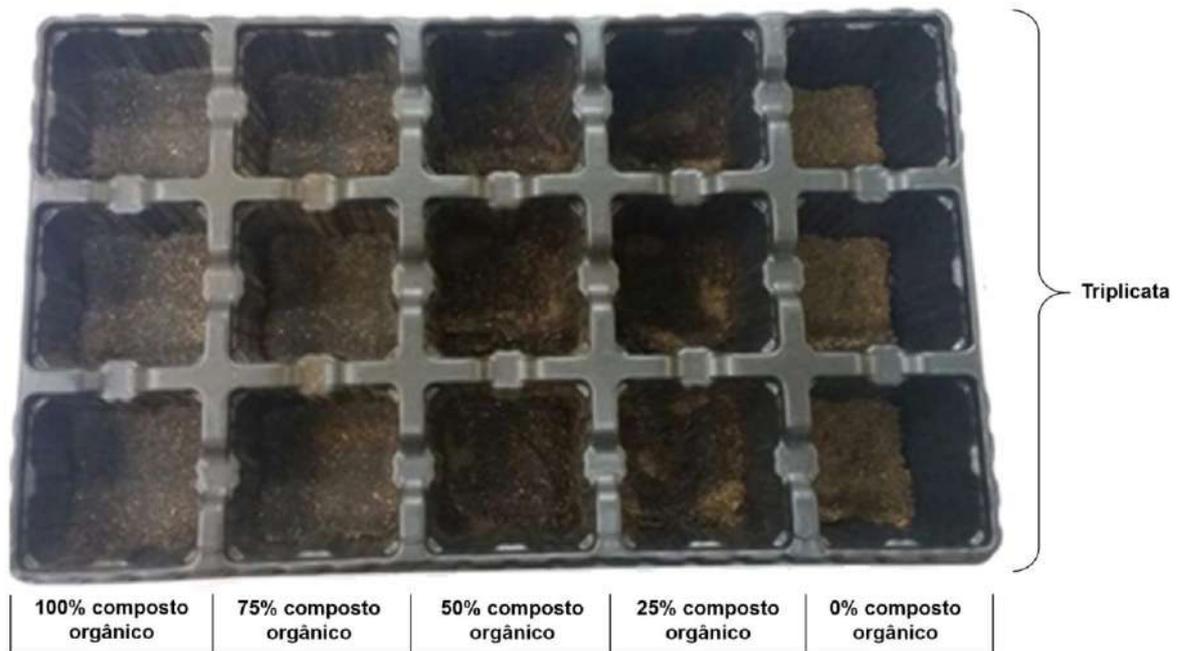
Dados em percentual (%)		Dados em massa (g)	
Adubo (%)	Solo (%)	Adubo (g)	Solo (g)
0	100	0	50
25	75	12,5	37,5
50	50	25	25
75	25	37,5	12,5
100	0	50	0

Foram preparadas duas formas completas, totalizando 15 compartimentos em cada uma delas, o que possibilitou a execução em triplicata para cada percentual de adubo nos substratos, conforme Figura 13.

Em ambas as formas foram utilizados adubos orgânicos produzidos pelo grupo MUDA, sendo que na primeira foi empregado o composto orgânico (mistura final) gerado na compostagem que foi acompanhada e na segunda o adubo orgânico comercializado na feira agroecológica que ocorre na entrada do bloco A do Centro de Tecnologia da UFRJ.

O solo utilizado foi coletado no Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (CEPEL), na região próxima à estação de corrosão atmosférica.

A massa total utilizada (50 g) foi definida de acordo com a capacidade de cada compartimento da fôrma disponível e foi adotada uma iluminação solar natural.



**Figura 13:** Fôrma de plástico e seus compartimentos com diferentes substratos para cultivo de feijão.

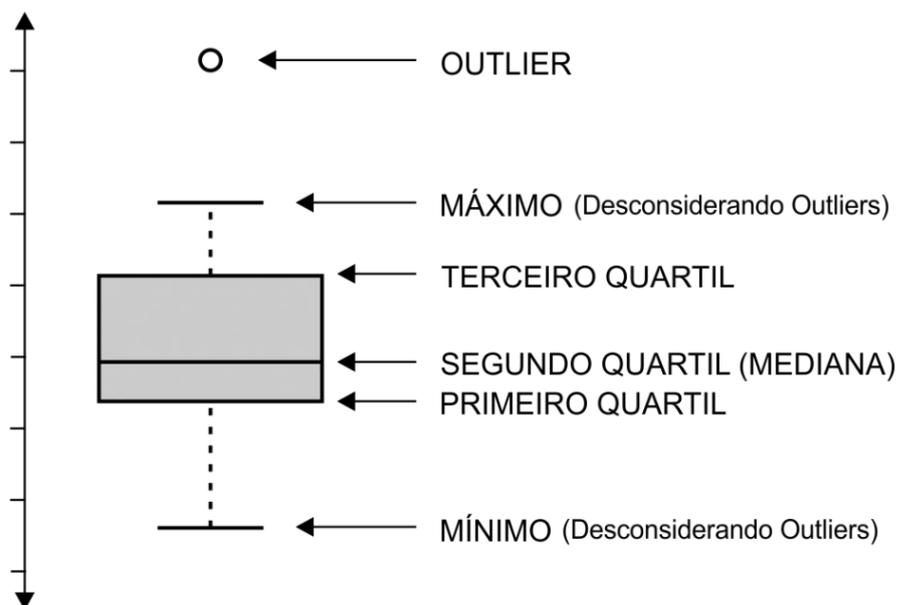
A semeadura dos grãos de feijão foi realizada dia 04/06/2018 e acompanhou-se o processo até o dia 05/07/2018, dando tempo necessário para desenvolvimento das plantas. Eis que para fins de comparação, foram coletados os dados de massa referentes a formação de biomassa total, biomassa de raízes e parte aérea das plantas que germinaram. Anteriormente a obtenção da massa de raízes, as mesmas foram retiradas do substrato por lavagem em água corrente.

#### 4.3.1. Análise Estatística

Como o propósito de avaliar e comparar a formação de biomassa total, aérea e de raiz do feijoeiro em diferentes substratos (solo com diferentes percentuais de composto orgânico), foi necessário a aplicação de uma ferramenta estatística, utilizando o software Minitab 17 (Minitab Inc.), aos dados obtidos nesse estudo.

Pelo Minitab são produzidos diagramas de caixas (boxplot), uma ferramenta gráfica que permite visualizar a distribuição e valores discrepantes (outliers) dos dados, fornecendo assim um meio para desenvolver uma perspectiva sobre o caráter dos dados, além de oferecer uma disposição gráfica comparativa.

As medidas de estatísticas descritivas como o mínimo, máximo, primeiro quartil, segundo quartil ou mediana e o terceiro quartil formam o boxplot, conforme Figura 14.



**Figura 14:** Diagrama Boxplot e suas medidas.

Fonte: FARIAS, (2018).

De acordo com a Figura 14, o local onde a haste vertical começa (de baixo para cima) indica o mínimo (excetuando algum possível valor extremo ou outlier) e, onde a haste termina indica o máximo (também excetuando algum possível outlier). O retângulo no meio dessa haste possui três linhas horizontais: a linha de baixo, que é o próprio contorno externo inferior do retângulo, indica o primeiro quartil. A de cima, que também é o próprio contorno externo superior do retângulo, indica o terceiro quartil. A linha interna indica o segundo quartil ou mediana. Os asteriscos ou pontos que às vezes aparecem no boxplot indicam que aquelas observações são atípicas, valores discrepantes, extremos ou outliers.

O limite de detecção de outliers é construído utilizando o intervalo interquartil, dado pela distância entre o primeiro e o terceiro quartil. Sendo assim, os limites inferior e superior de detecção de outlier são dados por:

- (i) Limite Inferior = Primeiro Quartil – 1,5 \* (Terceiro Quartil – Primeiro Quartil)
- (ii) Limite Superior = Terceiro Quartil + 1,5 \* (Terceiro Quartil – Primeiro Quartil)

Quanto aos quartis, dada a escala de mensuração dos dados, eles são os valores nessa escala que dividem o conjunto de dados em quatro partes, todas elas com o mesmo número de observações. Isso significa que 25% das observações são menores que o primeiro quartil, 50% são menores que o segundo quartil e 75% são menores que o terceiro quartil. Note que estamos falando de escala, de ordem. Assim, para calcularmos os quartis, deve-se ordenar os dados (FARIAS, 2018).

O cálculo se inicia com a mediana, ou segundo quartil – ela é o “valor do meio”, o valor que deixa metade das observações abaixo e a outra metade acima. O cálculo do primeiro e do terceiro quartis é feito calculando-se as medianas das duas metades – o primeiro quartil é a mediana da metade inferior e o terceiro quartil é a mediana da metade superior. Nesses cálculos despreza-se a mediana.

Na interpretação de um diagrama Boxplot devem ser levados em consideração a posição, dispersão, simetria e outliers.

- a) Posição: Em relação à posição dos dados, observa-se a linha central do retângulo (a mediana ou segundo quartil).
- b) Dispersão: A dispersão dos dados pode ser representada pelo intervalo interquartilico que é a diferença entre o terceiro quartil e o primeiro quartil (tamanho da caixa), ou ainda pela amplitude que é calculada da seguinte maneira: valor máximo – valor mínimo. Embora a amplitude seja de fácil entendimento, o intervalo interquartilico é uma estatística mais robusta para medir variabilidade uma vez que não sofre influência de outliers.
- c) Simetria: Um conjunto de dados que tem uma distribuição simétrica, terá a linha da mediana no centro do retângulo. Quando a linha da mediana está próxima ao primeiro quartil, os dados são assimétricos positivos e quando a posição da linha da mediana é próxima ao terceiro quartil, os dados são assimétricos negativos. Vale ressaltar que a mediana é a medida de tendência central mais indicada quando os dados possuem distribuição assimétrica, uma vez que a média aritmética é influenciada pelos valores extremos.
- d) Outliers – Já os outliers indicam possíveis valores discrepantes. No boxplot, as observações são consideradas outliers quando estão abaixo ou acima do limite de detecção de outliers.

#### **4.4. CARACTERIZAÇÕES**

Como etapa prévia às caracterizações, as amostras coletadas foram secas em estufa à 60°C por 24 horas e em seguida maceradas utilizando um moedor elétrico da marca Cuisinart. Logo após foram peneiradas em uma peneira de abertura de 200 mesh e analisadas conforme as técnicas e métodos descritos a seguir.

#### **4.4.1. Análise térmica**

As análises térmicas das amostras identificadas na Tabela 3 foram realizadas no Laboratório de Análise Térmica da Escola de Química, utilizando um equipamento da TA Instruments, modelo SDT Q600. Os parâmetros de análise foram: razão de aquecimento de 20°C/min da temperatura ambiente até 1000°C, atmosferas de ar (combustão) ou N<sub>2</sub> (pirólise) na vazão de 100 mL/min, massa de amostra em torno de 10 mg e cadinhos de alumina.

#### **4.4.2. Análise Imediata**

Tradicionalmente a análise imediata é realizada seguindo os procedimentos descritos nas normas ASTM (ASTM E-871 para umidade; ASTM E-830, D-1102 e UNE-EN 14775 para cinzas; ASTM E-872 e ASTM E- 1755 para material volátil), sendo o carbono fixo obtido por diferença (KHALIL et al., 2008).

Como todos esses métodos são demorados e baseiam-se no aquecimento de uma amostra em diferentes condições específicas, sendo os percentuais obtidos por diferença de massa, a utilização de termogravimetria é uma opção útil e rápida (MAYORAL et al., 2001).

De modo geral, quando a análise térmica é utilizada para obtenção dos percentuais da análise imediata, os experimentos são conduzidos em atmosfera inerte para medir umidade e matéria volátil e em atmosfera oxidante para medir carbono fixo e cinzas.

As análises imediatas para as misturas coletadas foram realizadas no Laboratório de Análises Térmicas da Escola de Química da UFRJ. Utilizou-se um equipamento da TA Instruments, modelo SDTQ 600, propondo os seguintes parâmetros de análise: rampa de aquecimento de 20°C min<sup>-1</sup> da temperatura ambiente até 600°C, em atmosfera de nitrogênio (100 mL min<sup>-1</sup>), seguida de uma isoterma de 60 minutos. Mudança do gás de arraste para ar (100 mL min<sup>-1</sup>) e nova rampa de aquecimento de 20°C min<sup>-1</sup>, da temperatura de 600°C até 1.000°C.

Utilizando-se os dados da curva TG são obtidos diretamente os percentuais de umidade, material volátil, carbono fixo e cinzas.

### **4.4.3. Difração de Raios X**

As análises de DRX foram realizadas no Laboratório de Tecnologia do Hidrogênio da Escola de Química da UFRJ, utilizando um difratômetro da Rigaku, modelo Miniflex II, com tubo de raios X de Cu e monocromador, para análise de estrutura cristalina.

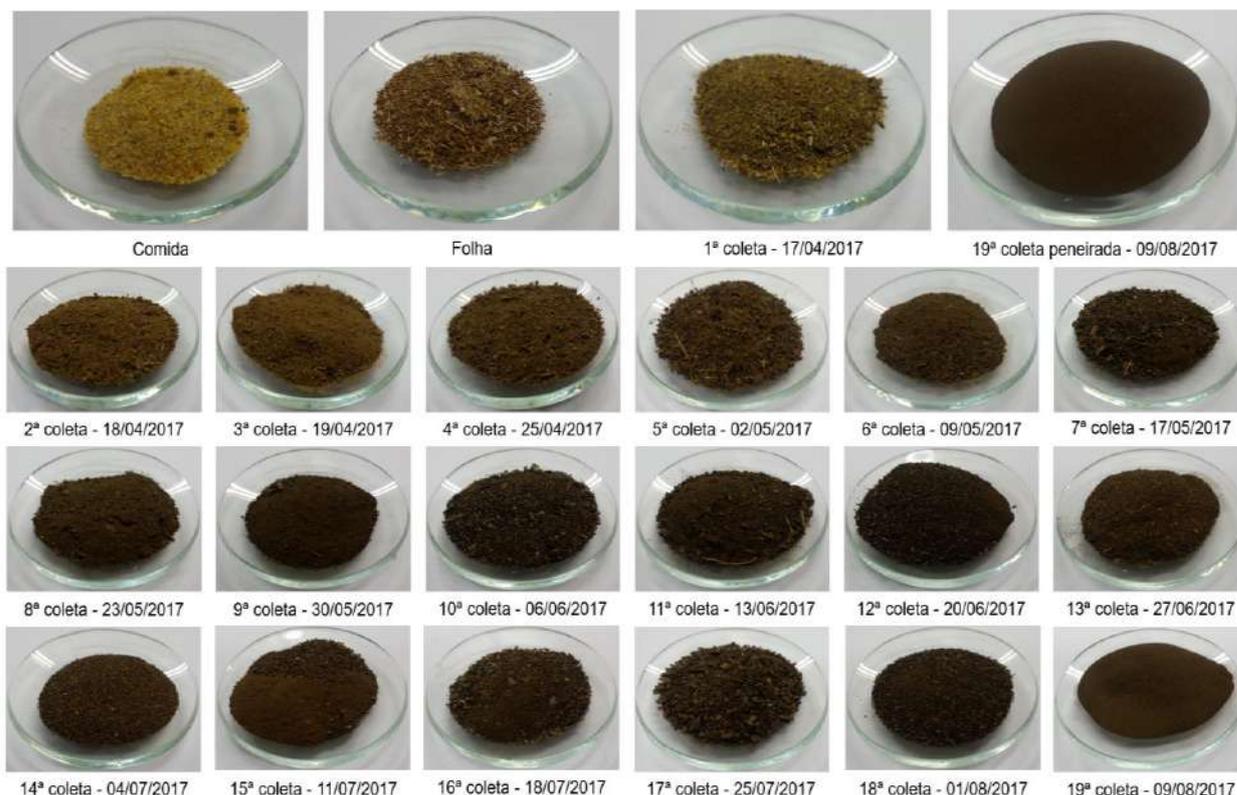
O ensaio foi realizado pelo método do pó (Powder Diffraction), operando com as seguintes condições: raio X de 40 kV/20 mA; varredura de 5° a 80° 2 $\Theta$ ; step de 0,02°. A interpretação qualitativa do difratograma gerado por esta análise foi efetuada no software MDI Jade 5, usando a base de dados PDF02 (ICDD, 2006) para comparação com o resultado obtido.

As amostras caracterizadas por essa técnica foram a comida, folha e mistura (coleta 1), mistura final (coleta 19) e o solo utilizado no teste de aplicabilidade.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. COMPOSTAGEM UTILIZANDO AERAÇÃO PASSIVA EM LEIRA

A Figura 15 apresenta um esquema com as cores dos materiais coletados durante o acompanhamento do processo entre os dias 17/04/2017 e 09/08/2017.



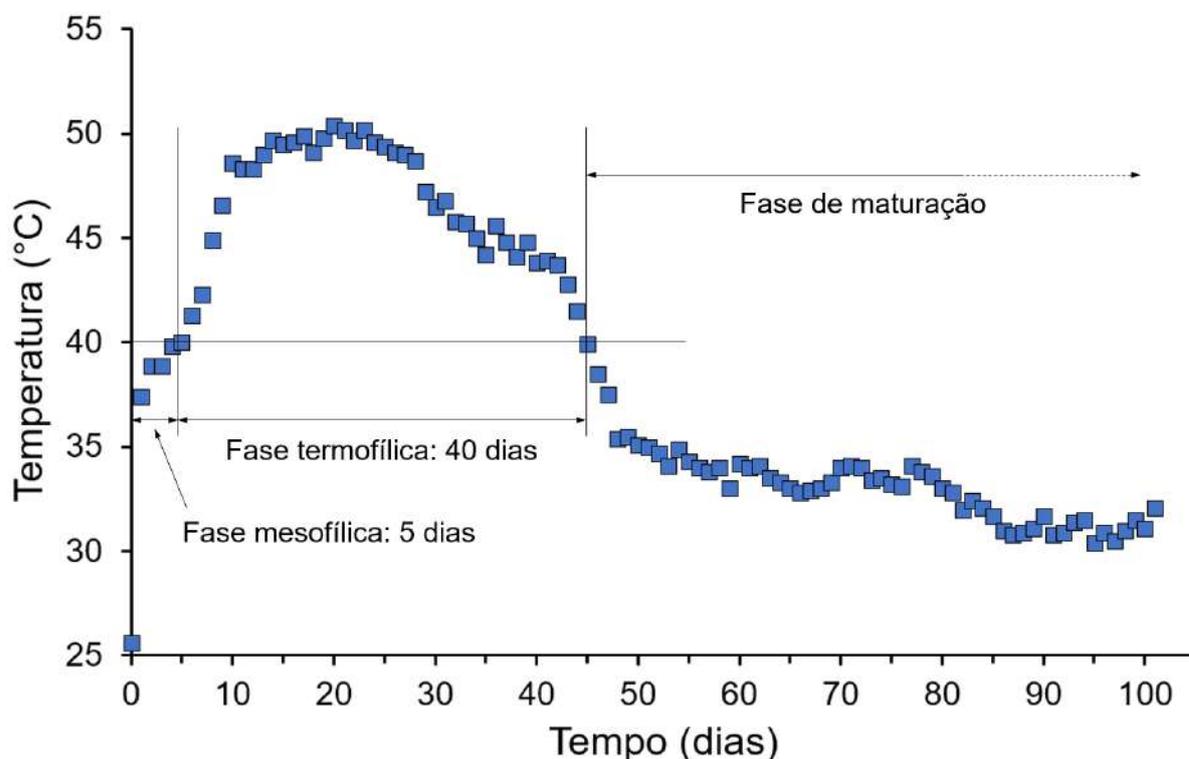
**Figura 15:** Cores dos materiais coletados durante o processo de aeração passiva em leira.

De acordo com a Figura 15, podemos verificar um escurecimento do material conforme a idade de coleta, o que é típico para processos de compostagem, tendo em vista os seus processos de biodegradação como, por exemplo, a fase de maturação que é responsável pela humificação dos materiais, tornando-os mais escuros.

Tendo em vista os processos de caracterização posteriores, foram feitas coletas de quantidades suficientes de folhas, resto de comida e compostos de várias idades, visando as análises futuras.

## 5.2. COMPOSTAGEM EM BOMBONA DE 200 LITROS

A Figura 16 apresenta o perfil de temperatura obtido para a compostagem em bombona de 200 L, utilizando medição por termopar inserido no interior da bombona junto a massa de resíduos. A medição de temperatura foi realizada em tempo real, sendo apresentados os dados médios de medição para o dia, os quais são representados por quadrados na figura.



**Figura 16:** Perfil de temperatura medido pelo termopar inserido no interior da bombona em função do tempo de compostagem.

Conforme pode ser visualizado na Figura 16, a linha horizontal marcada na temperatura de 40°C auxiliou na determinação dos períodos correspondentes as fases mesofílica, termofílica e de maturação no processo investigado.

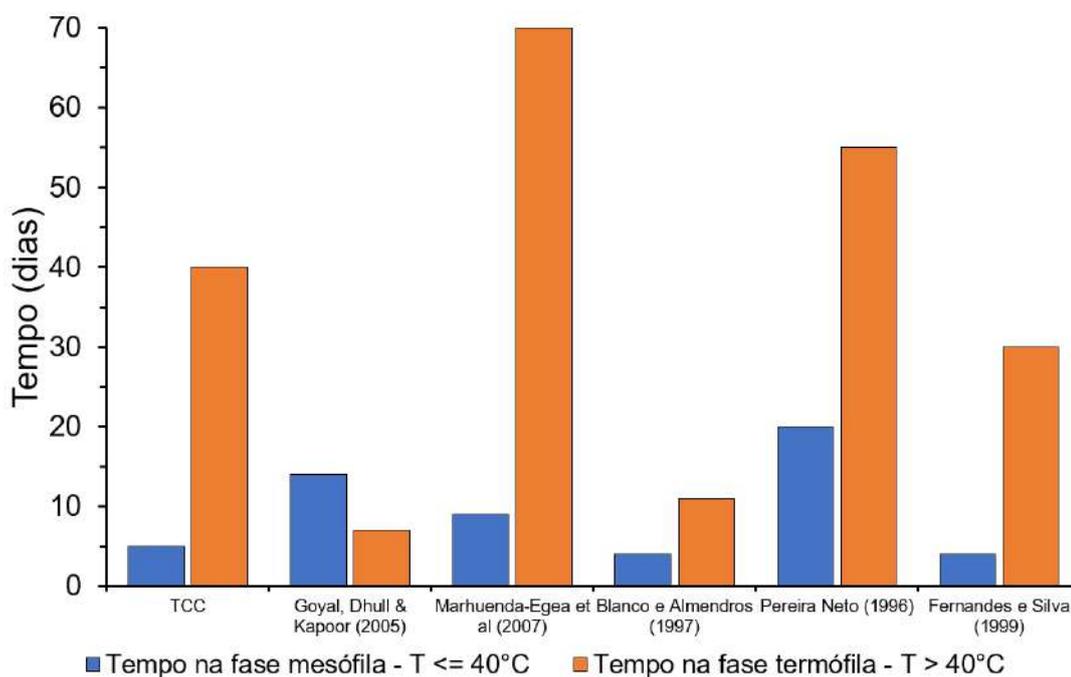
Nas faixas de temperatura menores ou iguais a 40°C identificamos a fase mesofílica (5 dias), já nas faixas de temperatura maiores que 40°C identificamos a fase termofílica (40 dias) e, finalizando, nas faixas de temperatura menores ou iguais a 40°C, em idades superiores a 50 dias, identificamos a fase de maturação.

Nos primeiros sete dias de compostagem notamos a liberação de gases de odores desagradáveis devido à presença de carne de frango nos restos de comida coletados no dia 31/08/2017. Este quando começou a sofrer os processos de

decomposição gerou esses tipos de gases devido a possíveis processos anaeróbios, uma vez que não foi feito o revolvimento periódico da leira, o que garantiria maior oxigenação para a massa de resíduos orgânicos.

No dia 10/12/2017, já passado o centésimo dia de acompanhamento da temperatura, desligamos o sistema e não desmontamos a leira, deixando o resíduo dentro da bombona, estabelecendo então 101 dias de medição.

A Figura 17 apresenta uma comparação dos períodos de tempo em fase mesofílica e termofílica para diversos processos de compostagem utilizando resíduos variados com o processo desenvolvido nesse TCC. GOYAL; DHULL; KAPOOR, (2005) compostaram resíduos de purificação do caldo de cana-de-açúcar, MARHUENDA-EGEA et al. (2007) compostaram resíduos da indústria do vinho junto com esterco de vaca, BLANCO ; ALMENDROS, (1997) compostaram palha de trigo com esterco de cavalo, já PEREIRA NETO, (1996) e FERNANDES; SILVA, (1999) compostaram restos de comida.



**Figura 17:** Comparação dos períodos de tempo em fase mesofílica e termofílica para diversos processos de compostagem utilizando resíduos variados.

Observando a comparação dos períodos de tempo nessas duas fases, podemos verificar que as diferentes matérias-primas utilizadas nas compostagens e

ações como o revolvimento dos materiais ao longo do tempo influenciaram bastante as suas respectivas durações.

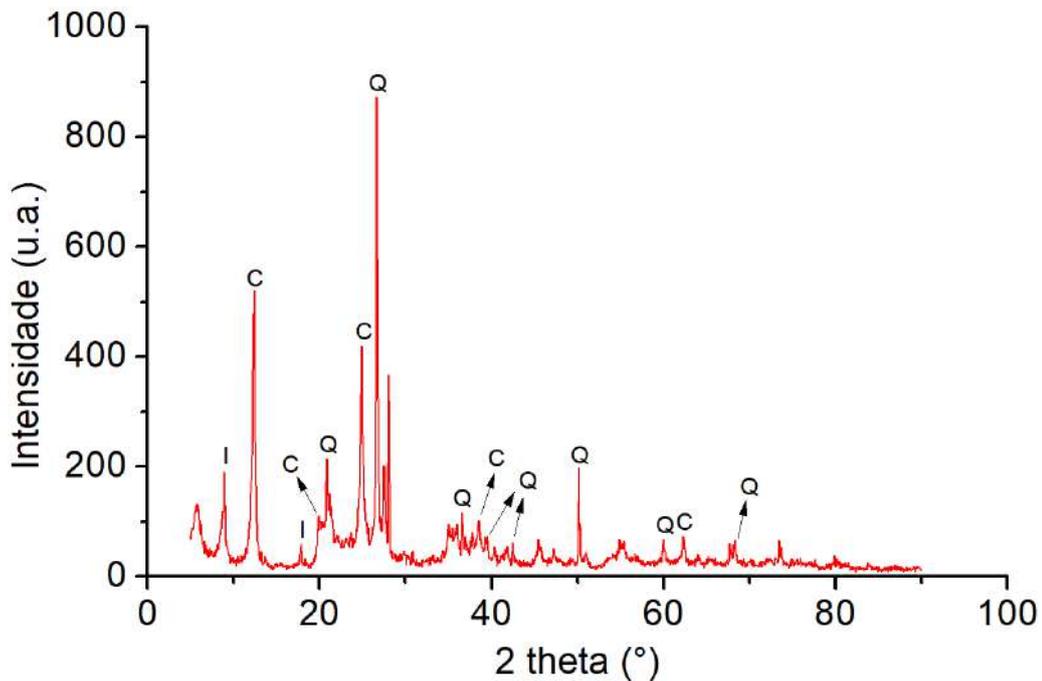
Os processos de compostagem dos finos gerados no processo de purificação do caldo de cana-de-açúcar e da mistura de palha de trigo com esterco de cavalo apresentaram os menores períodos de duração nas duas etapas em função das condições de suas matérias-primas, as quais apresentaram pequenas dimensões, logo maiores superfícies de contato com o oxigênio. Em função da utilização do revolvimento dos materiais ao longo do tempo, os processos de degradação aeróbia e suas respectivas biodegradações acentuaram-se (GOYAL; DHULL; KAPOOR, 2005).

Já os processos de compostagem de resíduos orgânicos (resto de comida) desenvolvidos por PEREIRA NETO, (1996) e FERNANDES; SILVA, (1999) foram aqueles que apresentaram duração de ambas as fases com período de duração próximos dos valores encontrados nesse trabalho e isso deve-se a utilização do mesmo tipo de matéria-prima.

### **5.3. CARACTERIZAÇÕES**

#### **5.3.1. Difração de Raios X**

A Figura 18 apresenta o difratograma de raios-X para o solo que foi utilizado como constituinte nos substratos investigados na aplicação do adubo orgânico para o cultivo de feijão.

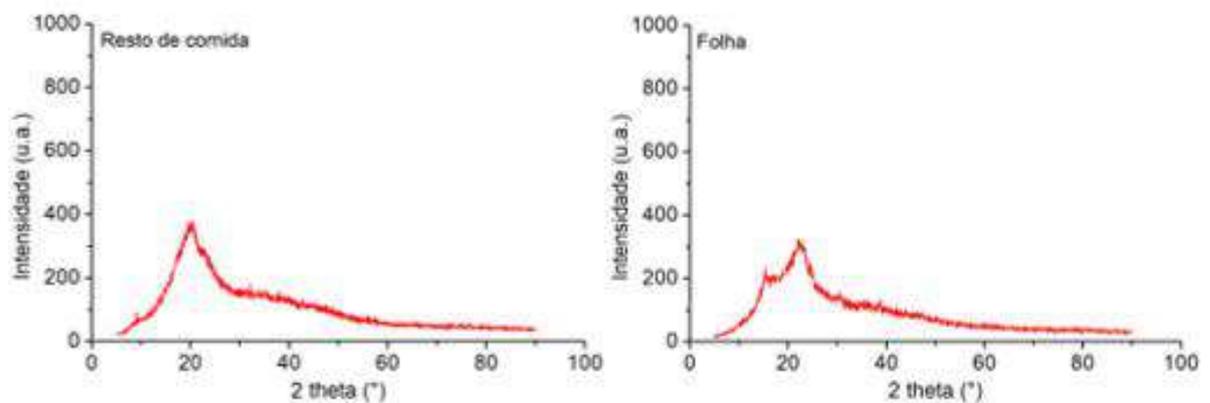


**Figura 18:** Difratoograma de raios-X para o solo (Q=Quartzo= $\text{SiO}_2$ , C=Caulinita= $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , I=Ilita= $3\text{K}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 26\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ).

O solo analisado apresentou características cristalinas, sendo identificadas as fases referentes ao quartzo, caulinita e ilita. A presença de quartzo relacionou-se com a característica arenosa e textura seca exibida pelo solo, já a presença de argilas, como a caulinita e a ilita, foi essencial para estabelecer a sua capacidade de troca de cátions (CTC) e capacidade de retenção de água.

A presença das argilas no solo compactua diretamente com a disponibilidade de íons que fornecem elementos com função nutriente para as raízes das plantas, além de auxiliar na sua capacidade de reter água.

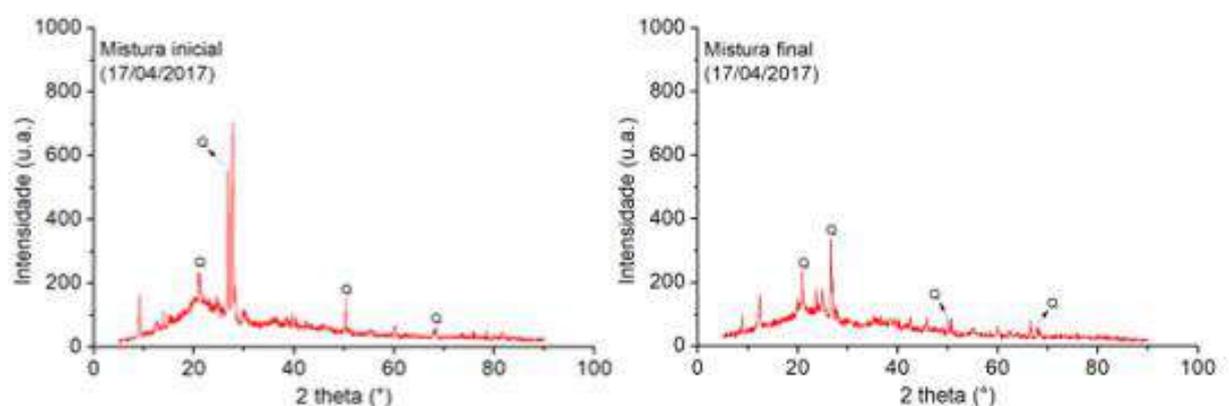
A Figura 19 apresenta os difratogramas de raios-X para as matérias-primas da compostagem, as folhas e os restos de comida.



**Figura 19:** Difratoograma de raios-X para os restos de comida e folha utilizados nos processos de compostagem.

Conforme podemos observar, as matérias-primas utilizadas na compostagem apresentaram difratogramas típicos de materiais amorfos, ou seja, os raios-X, ao incidirem em ambos os materiais, foram espalhados para várias direções, levando a um aumento de intensidade que se distribuiu em uma ampla faixa, ao invés de picos mais estreitos e de alta intensidade como no caso dos materiais cristalinos.

A Figura 20 apresenta os difratogramas de raios-X para a mistura inicial (coletada em 17/04/2017) e mistura final (coletada em 09/08/2017) coletadas no processo de compostagem.



**Figura 20:** Difratoograma de raios-X para a mistura inicial e mistura final coletadas no processo de compostagem (Q=Quartzo= $\text{SiO}_2$ ).

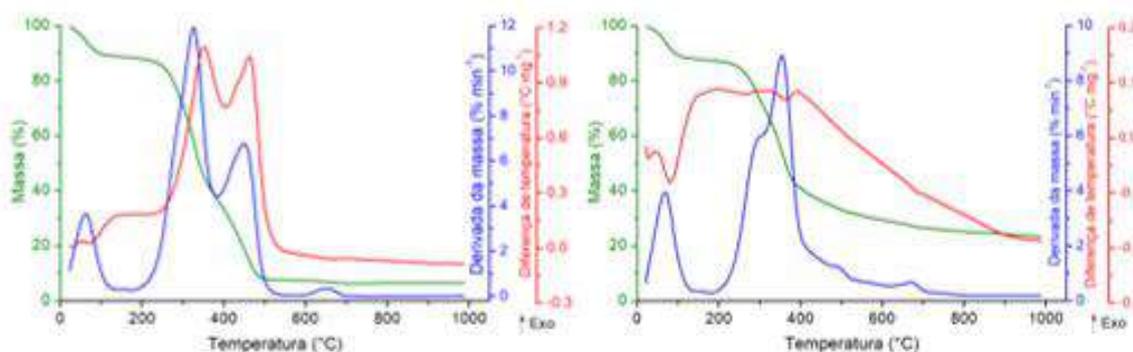
Durante o processo de compostagem, a matéria orgânica é degradada e as fases minerais existentes nos compostos orgânicos (misturas) formam produtos

estáveis. Assim sendo, por meio da análise dos picos gerados pelo difratogramas de compostos orgânicos de diferentes idades pode-se verificar o seu grau de mineralização.

Conforme podemos verificar, o quartzo é a fase mineral presente em maior quantidade nas misturas inicial e final. Nota-se que apesar da mistura inicial apresentar picos mais intensos, o processo de mineralização promovido pelo processo de compostagem gerou na mistura final uma maior quantidade de picos, neste caso menos intensos.

### 5.3.2. Análise térmica

A Figura 21 apresenta as curvas TG, DTG e DTA da folha analisada em atmosfera de ar e N<sub>2</sub>.



**Figura 21:** Curvas TG, DTG e DTA para a folha (coleta 1) analisada em atmosfera de ar (esquerda) e N<sub>2</sub> (direita).

A análise da folha em ar, ou seja, sua combustão, apresentou comportamento térmico relacionado com as seguintes transformações:

- i. Perda de água livre entre 40°C e 140°C, identificada pelo pico DTG e pico DTA endotérmico.
- ii. Combustão da fração orgânica entre 200°C e 550°C, identificada pelos picos DTG e picos DTA exotérmicos. Logo após a perda de água livre existem duas fases principais de significativa perda de massa, as quais terminam respectivamente em 380°C e 550°C, ambas caracterizadas por seus picos DTG.

Nessas duas etapas, ocorre uma combustão quase completa dos compostos orgânicos iniciais (primeiro estágio) e dos materiais pirolisados formados durante a

primeira etapa (segundo estágio), nos quais uma grande quantidade de energia é liberada, a qual é identificada pelos dois picos exotérmicos na curva DTA.

Como pode ser visto, o pico DTA do primeiro estágio inicia-se após seu pico DTG correspondente, o que indica que a perda de massa no início dessa etapa ocorre pela liberação de voláteis e de pirólise do material orgânico presente, ambas com características endotérmicas. O fenômeno exotérmico é observado somente quando ocorre a combustão dos gases liberados (DWECK, 2008).

Nesses dois estágios principais de combustão ocorrem as decomposições da hemicelulose, celulose e lignina, formando gases que são queimados, seguidas da combustão do produto sólido formado, o char.

iii. Perda de dióxido de carbono pela decomposição do carbonato de cálcio entre 600°C e 700°C, identificada pelo pico DTG e pico DTA endotérmico.

No caso da análise da folha em atmosfera de nitrogênio (pirólise), o comportamento térmico da amostra apresentou as seguintes transformações:

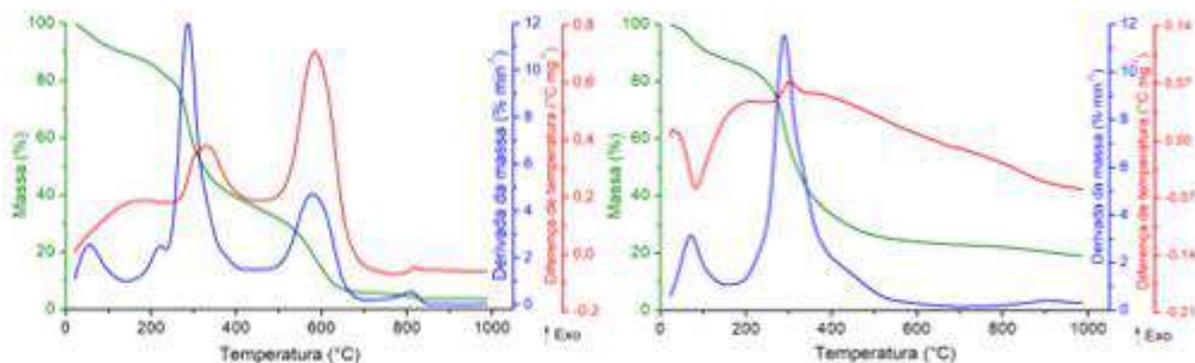
i. Perda de água livre entre 40°C e 150°C, identificada pelo pico DTG e pico DTA endotérmico;

ii. Decomposição do material lignocelulósico entre 150°C e 600°C, identificada pelos picos DTG sobrepostos e caráter endotérmico da curva DTA. Segundo YANG et al., (2007), RAVEENDRAN; GANESH; KHILAR, (1996) e ORFAO; ANTUNES; FIGUEIREDO, (1999) a pirólise de qualquer biomassa é a sobreposição dos seus três componentes principais, ou seja, hemicelulose, celulose e lignina.

A hemicelulose inicia sua decomposição facilmente com a perda de massa ocorrendo entre 160°C e 315°C. A decomposição da celulose acontece em temperaturas mais altas, na faixa de 280°C a 380°C. Já a decomposição da lignina ocorre lentamente e em ampla faixa de temperatura, de 160°C a 600°C, sendo o componente lignocelulósico que se decompõe com menor taxa de perda de massa.

iii. Perda de dióxido de carbono pela decomposição do carbonato de cálcio, identificada pelo pico DTG e caráter endotérmico da curva DTA.

A Figura 22 apresenta as curvas TG, DTG e DTA para o resto de comida analisado em atmosfera de ar e N<sub>2</sub>.



**Figura 22:** Curvas TG, DTG e DTA para o resto de comida (coleta 1) analisado em atmosfera de ar (esquerda) e N<sub>2</sub> (direita).

A princípio, pela Figura 22, a combustão do resto de comida apresenta comportamento térmico parecido com o da folha. A primeira etapa, na faixa de 40-150°C, refere-se a perda de água. Logo após, ocorre a combustão da amostra em duas etapas bastante intensas que ocorrem nos intervalos de 150-450°C e 450-700°C, ambas caracterizadas por seus dois picos DTG e picos DTA exotérmicos.

No intervalo entre 150-450°C ocorre a decomposição dos óleos leves e carboidratos existentes nos restos de comida, seguida da queima dos seus gases gerados, o que caracteriza o processo como exotérmico (pico DTA para cima). Logo após, no intervalo entre 450-700°C, ocorre a queima da fração decomposta anteriormente, junto com os componentes de maior estabilidade térmica existentes na comida, a qual propicia um fenômeno exotérmico mais intenso

A última etapa de perda de massa ocorre na faixa de temperatura entre 700-800°C e poderia ser atribuída a volatilização do NaCl existente na comida, no entanto como não foi possível a identificação do sal por DRX, essa última provavelmente deve-se referir a decomposição de algum componente inorgânico de alta estabilidade térmica existente na comida.

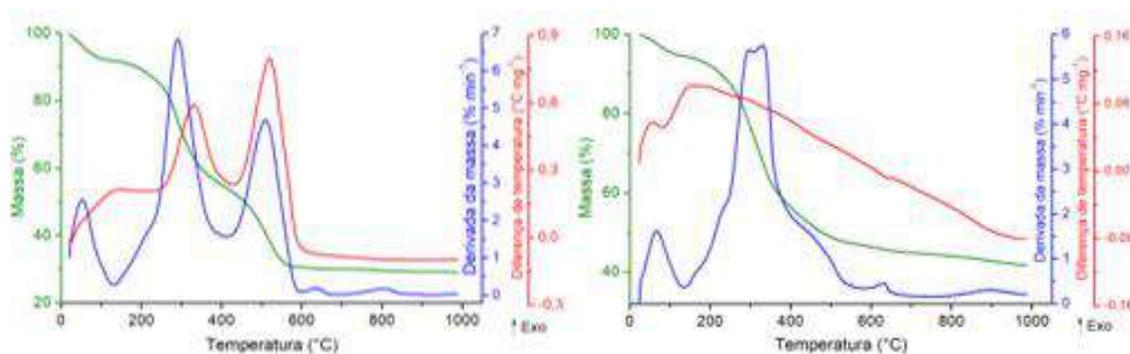
O comportamento térmico do resto de comida analisado em nitrogênio também foi parecido com o apresentado pela folha. Em atmosfera inerte, o resto de comida apresentou as seguintes transformações:

- i. Perda de água livre entre 40°C e 150°C, identificada pelo pico DTG e pico DTA endotérmico;
- ii. Decomposição de polissacarídeos (amido, hemicelulose e celulose) e compostos fenólicos (lignina) entre 150°C e 600°C. A decomposição do amido e da

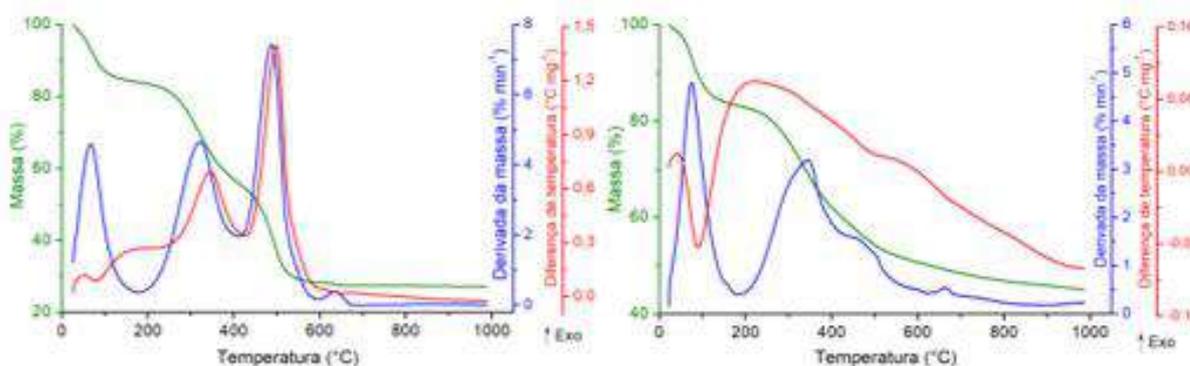
hemicelulose ocorre em temperaturas 150°C e 315°C. A decomposição da celulose acontece em temperaturas mais altas, na faixa de 280°C a 380°C. Já a decomposição da lignina ocorre lentamente e em ampla faixa de temperatura, de 160°C a 600°C;

iii. Decomposição de componente inorgânico de alta estabilidade térmica entre 800 e 1000°C.

As Figuras 23 e 24 apresentam as curvas TG, DTG e DTA para as misturas inicial e final, analisadas em atmosfera de ar e N<sub>2</sub>.



**Figura 23:** Curvas TG, DTG e DTA para a mistura inicial (coleta 1) analisada em atmosfera de ar (esquerda) e N<sub>2</sub> (direita).



**Figura 24:** Curvas TG, DTG e DTA para a mistura final (coleta 19) analisada em atmosfera de ar (esquerda) e N<sub>2</sub> (direita).

O perfil das curvas TG, DTG e DTA em ar para as misturas inicial e final apresentaram comportamento parecido com aquele já identificado para as amostras de folha e resto de comida. Essa situação já era de se esperar justamente porque a composição das misturas é dada na razão de 3:1 de folhas e restos de comida. Isso propiciou visualizar nas curvas TG, DTG e DTA das misturas, os efeitos térmicos

somados. Assim sendo, as principais transformações térmicas de ambas as amostras em ar foram:

i. Perda de água na faixa de 40-120°C para mistura inicial e 40-170°C para mistura final. Essa diferença se deve a biodegradação ocorrida no composto de maior idade, a qual liberou poros anteriormente preenchidos os quais a água ocupou. Além disso, durante o período de compostagem na leira, não foi feito controle da água de chuvas, o que compactua com o maior teor de umidade da mistura final;

ii. Combustão das misturas entre 120-600°C: dada em duas etapas, sendo a primeira correspondente à decomposição dos polissacarídeos (amido, hemicelulose e celulose), com a liberação e queima dos seus voláteis. Já na segunda etapa, ocorre a queima da fração decomposta na etapa anterior junto com a fração fenólica mais complexa.

Nota-se que a altura e a área do 3° pico DTA para a mistura final é superior ao pico correspondente na mistura inicial. Isso ocorreu devido ao processo de biodegradação o qual decompôs parcialmente os polissacarídeos e concentrou cada vez mais os materiais de degradação mais lenta, como a lignina. Assim sendo, quando esses materiais de estrutura complexa foram queimados, resultaram em efeito exotérmico superior ao efeito da mistura inicial, a qual ainda não tinha sido submetida a compostagem.

iii. Perda de dióxido de carbono pela decomposição de carbonato de cálcio entre 600°C e 700°C, identificada pelo pico DTG e pico DTA endotérmico.

iv. Decomposição de algum componente inorgânico de alta estabilidade térmica entre 700 e 900°C. No caso da mistura final, esse processo de decomposição não ocorreu dada a ausência do componente que provavelmente foi lixiviado pela água de chuva no decorrer do processo de compostagem.

A mistura inicial, por representar a soma dos componentes (folha e resto de comida) antes dos processos de biodegradação, mostrou em suas curvas TG, DTG e DTA a soma dos efeitos térmicos das matérias-primas originais.

Quando as misturas inicial e final foram analisadas em nitrogênio, o perfil de suas respectivas curvas TG, DTG e DTA também foi similar ao já identificado para as amostras de folha e resto de comida. Suas principais transformações térmicas foram:

i. Perda de água na faixa de 40-120°C para mistura inicial e 40-170°C para mistura final;

ii. Decomposição de polissacarídeos (amido, hemicelulose e celulose) e compostos fenólicos (lignina) entre 120°C e 600°C. Notou-se que nessa faixa de temperatura a área de pico DTG para a mistura final é menor que a da mistura inicial, devido a facilidade de degradação de compostos como os polissacarídeos no processo de compostagem;

iii. Perda de dióxido de carbono pela decomposição do carbonato de cálcio entre 600°C e 700°C, identificada pelo pico DTG e pico DTA endotérmico.

iv. Decomposição de algum componente inorgânico de alta estabilidade térmica entre 800 e 1000°C.

Comparando as massas das misturas na temperatura de 1000°C verificou-se que a mistura final apresenta maior massa residual. Isso ocorreu em função do processo de compostagem ter concentrado nessa amostra os materiais de estrutura química mais complexa (lignina) e de difícil degradação. Com isso, ao ser analisada em nitrogênio, sofre menos decomposição e perde menos massa.

A seguir serão comparadas as análises térmicas para as várias misturas coletadas durante o processo de compostagem.

#### 5.3.2.1. Comparação das coletas em N<sub>2</sub>

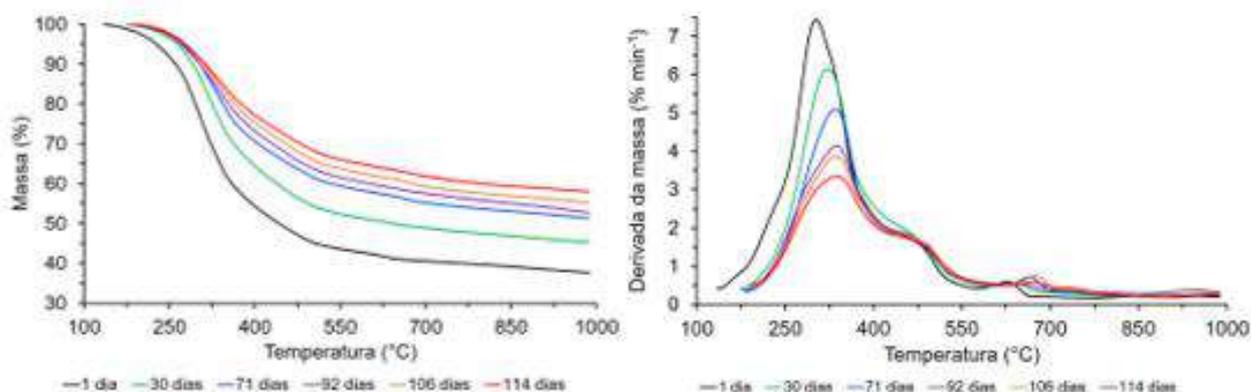
Em termos de composição, a mistura inicial era constituída de resíduos orgânicos na proporção de uma parte de restos de comida para três partes de folhas. Essas somadas formam uma mistura heterogênea, cujos principais componentes estruturais orgânicos são a hemicelulose, a celulose e a lignina, que contêm adições de fases orgânicas e inorgânicas em suas matrizes.

No decorrer do tempo do processo de compostagem, os microorganismos pela ação de enzimas, promovem a decomposição da hemicelulose e da celulose e concentram a lignina, a qual é bastante resistente à decomposição (VAN ELSAS; JANSSON; TREVORS, 2006). Segundo ELDOR (2015) a decomposição da hemicelulose e da celulose é dada em dias ou semanas, sendo o consumo da glicose pela despolimerização da celulose extremamente rápido.

Quando analisadas em atmosfera de nitrogênio, as composições químicas das coletas são diferentes na faixa que se estende da temperatura ambiente até 1000°C, não sendo possível obter uma base comum composicional para uma comparação quantitativa direta. Por esse motivo, foi feita a comparação das curvas TG e DTG das

diferentes coletas em base seca. Nessa base, transformou-se por regra de três todos os pontos das curvas, supondo a massa seca de cada uma ser 100%.

A Figura 25 apresenta a superposição das curvas TG e DTG em base seca para a 2<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup>, 16<sup>a</sup>, 18<sup>a</sup> e 19<sup>a</sup> (mistura final) coleta.



**Figura 25:** Curvas TG e DTG em base seca para as misturas de diferentes idades analisadas em N<sub>2</sub>.

Conforme podemos verificar pela Figura 25, quanto maior foi o período no qual a mistura foi submetida ao processo de aeração passiva, maior foi sua massa de cinzas a 1000°C e menor foi o pico DTG sobreposto de decomposição de seu material lignocelulósico. Isso ocorreu, porque a mistura sofreu prévia oxidação no processo de compostagem, o que propiciou uma redução no percentual em massa dos componentes orgânicos mais simples e de fácil degradação (amido, hemicelulose e celulose) e concentrou os componentes mais complexos e de difícil degradação (lignina).

Esses materiais pesados quando analisados em atmosfera de N<sub>2</sub> sofreram decomposição com menores velocidades de perda de massa por serem mais estáveis, o que justifica suas massas de cinzas a 1000°C cada vez maiores.

### 5.3.2.2. Comparação das coletas em ar

Visando comparar as curvas TG, DTG e DTA das diferentes misturas utilizou-se uma metodologia de cálculo desenvolvida por DWECK et al. (2009), para materiais cimentícios.

No caso desse estudo, ao invés de compararmos pastas hidratadas de cimento em diferentes idades, serão comparadas misturas submetidas a diferentes períodos

de compostagem, as quais possuem na temperatura de 1000°C a mesma composição em óxidos, o que permite uma comparação direta entre elas.

Neste método, as curvas TG e DTG originais foram multiplicadas por um fator F, expressado pela Equação 1, visando seus dados para a base da mistura inicial, ou seja, aquela coletada dia 17/04/2017, possibilitando comparar corretamente os dados das misturas de diferentes idades com os dados da mistura inicial.

$$F = \frac{\text{Massa calcinada a } 1000^{\circ}\text{C da mistura inicial coletada dia 17/04/2017}}{\text{Massa calcinada a } 1000^{\circ}\text{C da mistura coletada dia --/--/----}} \quad \text{Equação 1}$$

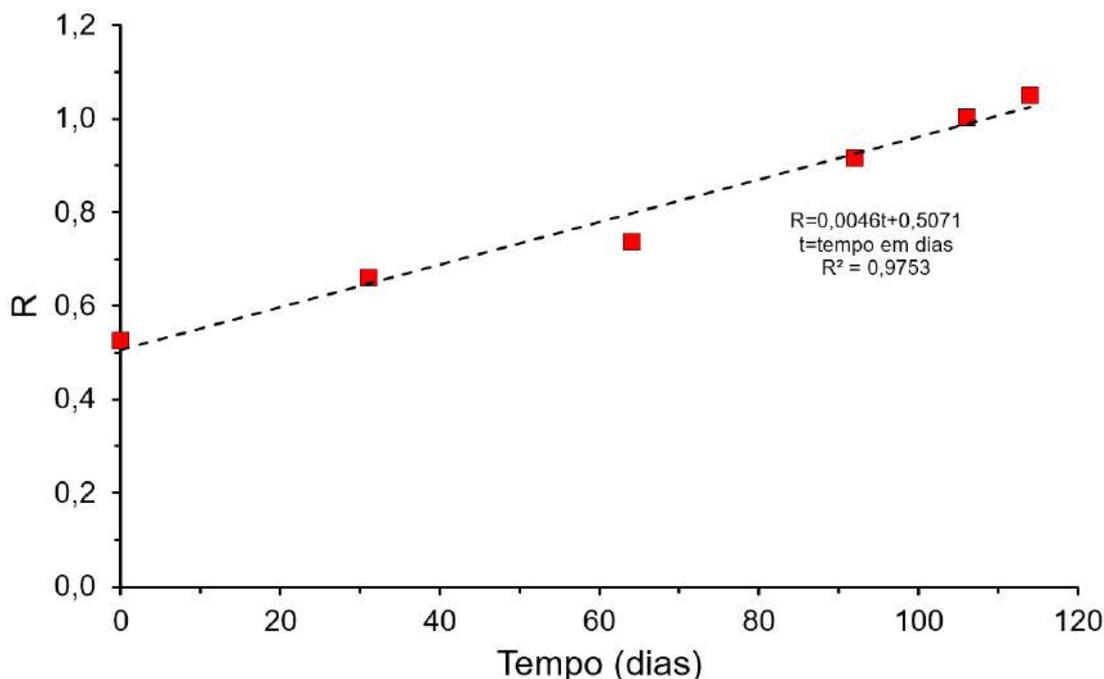
Com os dados das curvas já calculados, fez-se a determinação das perdas de massa para cada uma das duas etapas que correspondem o processo de combustão das misturas, as quais ocorrem na faixa de 120-400°C (1ª etapa de combustão) e 400-600°C (2ª etapa de combustão).

A Tabela 5 apresenta para as misturas de várias idades os valores obtidos de perda de massa para cada uma dessas etapas, além da razão de proporção entre as etapas, dado por R.

**Tabela 5:** Perdas de massa para a 1ª e 2ª etapa de combustão e sua razão de proporção para as misturas de várias idades.

Data da coleta	Tempo de compostagem (dias)	Perda de massa na 1ª etapa de combustão (%)	Perda de massa na 2ª etapa de combustão (%)	Razão de proporção R $R = \frac{\Delta m \text{ 2}^{\circ} \text{ etapa}}{\Delta m \text{ 1}^{\circ} \text{ etapa}}$
17/04/2017	0	45,68	24,03	0,53
18/05/2018	31	42,26	27,92	0,66
20/06/2017	64	24,61	18,12	0,74
18/07/2017	92	23,33	21,39	0,92
01/08/2017	106	21,30	21,38	1,00
09/08/2017	114	18,04	18,97	1,05

Utilizando os dados da Tabela 5 elaborou-se o gráfico de como varia a relação de proporção de perda de massa com o tempo de compostagem, a qual é apresentada na Figura 26.

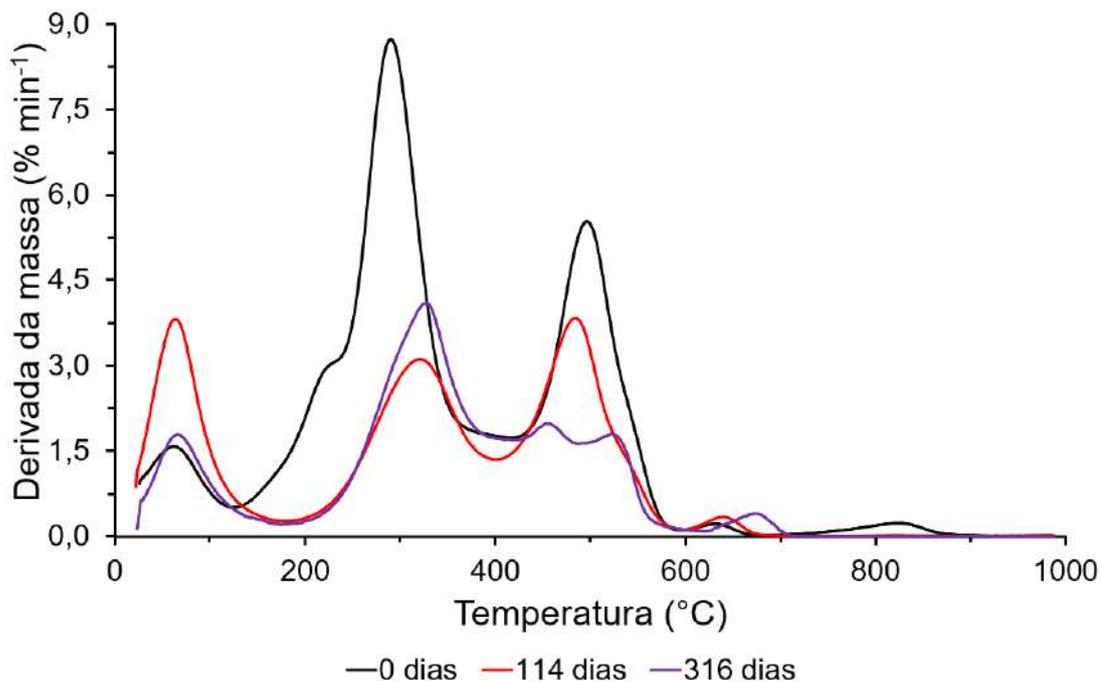


**Figura 26:** Variação da proporção de perda de massa nas misturas de várias idades.

Segundo DELL'ABATTE, BENEDETTI; SEQUI, (2000), a relação (R) entre as perdas de massa associadas à segunda e à primeira etapa de combustão é um parâmetro confiável para avaliar o nível de maturação da matéria orgânica nos compostos. Este valor indica a quantidade relativa da fração termicamente mais estável da matéria orgânica em relação ao menos estável, sem levar em conta a umidade da amostra ou o conteúdo de cinzas.

Durante a compostagem, a razão R aumentou (Figura 26), revelando uma alta sensibilidade às mudanças químicas induzidas pela biotransformação de materiais orgânicos. De fato, a proporção foi 2 vezes maior para a amostra após 114 dias de compostagem do que na amostra com 0 dias.

Para finalizar as comparações em ar, fez-se a análise térmica do composto orgânico coletado após 316 dias de compostagem na bombona de 200 L, visando compara-lo com os casos da mistura inicial (0 dias) e final (114 dias) obtidas por aeração passiva em leira. A Figura 27 apresenta essa comparação na forma de curvas DTG.



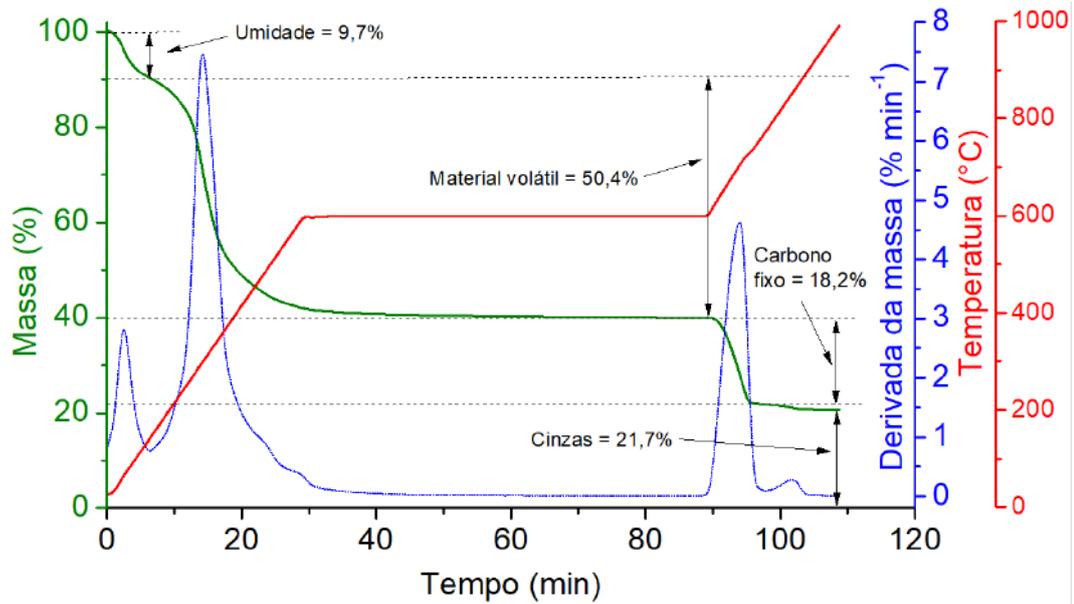
**Figura 27:** Comparação das curvas DTG em ar dos compostos de diferentes idades.

Conforme podemos verificar pela Figura 27, a curva DTG para o composto obtido por 0 dias computou uma variação de massa na 1<sup>a</sup> etapa de combustão maior que a 2<sup>a</sup> etapa. No composto obtido ao final de 114 dias o perfil se inverteu, ou seja, a variação de massa na 2<sup>a</sup> etapa foi superior à da 1<sup>a</sup> etapa, o que compactua com a variação de proporção R já apresentada.

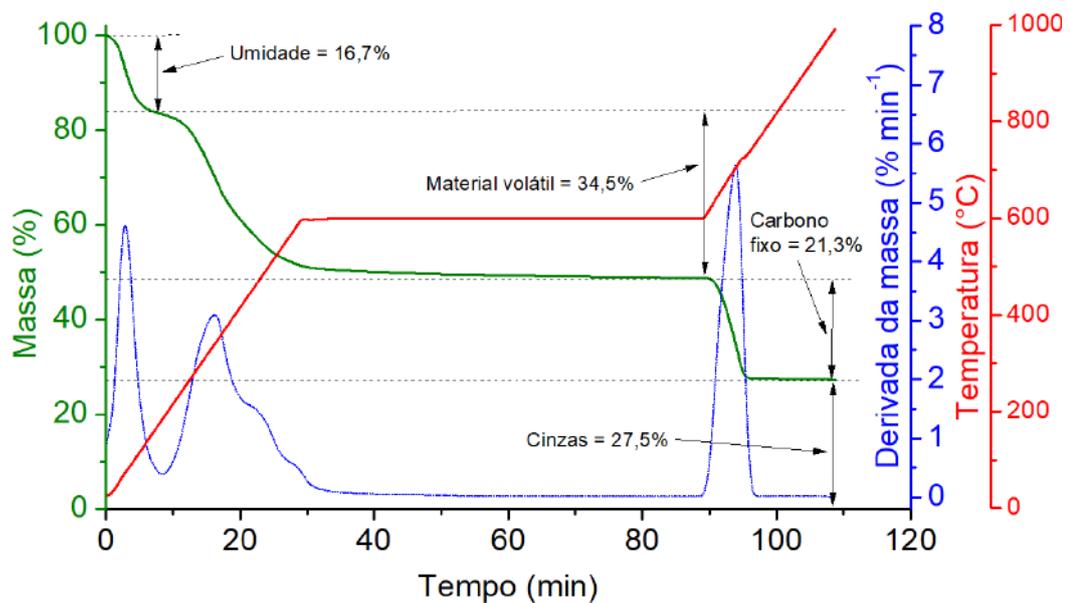
Já para o composto obtido ao final de 316 dias, deu-se o tempo necessário para ação de fungos e posterior biodegradação da lignina, visto que fica clara a modificação na curva DTG, referente a 2<sup>a</sup> etapa de perda de massa, a qual transformou-se em duas etapas que ocorrem entre 400 e 600°C, evidenciando que somente nesse caso foi dado o tempo necessário para degradação dos componentes mais estáveis.

### 5.3.3. Análise Imediata

As Figuras 28 e 29 apresentam os resultados da análise imediata para a mistura inicial e a final, gerados a partir do software Universal Analysis 2000, fornecido pela TA Instruments. Os dados estão nas formas de curvas TG, DTG e temperatura, as quais propiciaram a obtenção direta dos percentuais de umidade, material volátil, carbono fixo e cinzas.



**Figura 28:** Curvas TG, DTG, temperatura e os percentuais de umidade, material volátil, carbono fixo e cinzas obtidos para a mistura inicial.



**Figura 29:** Curvas TG, DTG, temperatura e os percentuais de umidade, material volátil, carbono fixo e cinzas obtidos para a mistura final.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados das análises imediatas, em base ao dados iniciais e base seca, na forma de percentuais para os compostos de várias idades.

**Tabela 6:** Análise imediata em base aos dados iniciais e em base seca para as misturas de várias idades.

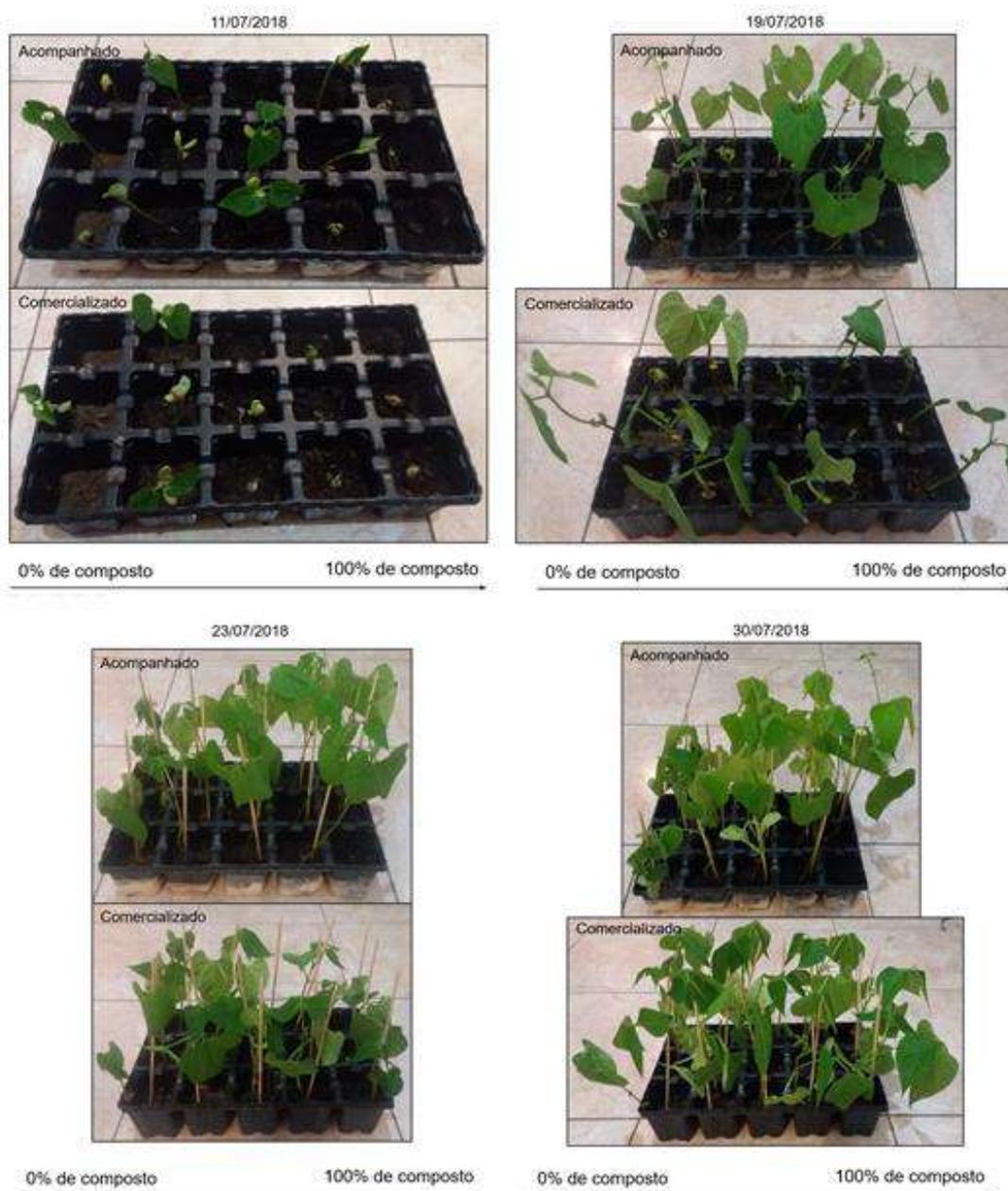
<b>Tempo de compostagem (dias)</b>	<b>0</b>	<b>31</b>	<b>64</b>	<b>85</b>	<b>106</b>	<b>114</b>
Umidade (%)	9,7	10,6	12,5	14,7	14,8	16,7
Material volátil (%)	50,4	45,8	36,5	42,8	41,1	34,5
Carbono fixo (%)	18,2	18,9	19,5	21,5	21,7	21,3
Cinzas (%)	21,7	24,7	31,5	21,0	22,4	27,5
Total (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<b>Análise Imediata em base seca</b>						
Material volátil (%)	55,8	51,2	41,7	50,2	48,3	41,4
Carbono fixo (%)	20,1	21,1	22,3	25,2	25,5	25,6
Cinzas (%)	24,1	27,6	36,1	24,6	26,3	33,0
Total (%)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Conforme podemos verificar, quanto maior foi o período no qual os materiais ficaram submetidos ao processo de compostagem, maior foi o percentual de carbono fixo em base seca. Esse dado corrobora com as afirmações já realizadas nos itens anteriores, uma vez que o carbono fixo é o material que se decompõem somente em temperaturas acima de 600°C em atmosfera oxidante.

O percentual crescente de carbono fixo nas misturas de maior idade retrata o efeito dado pela biodegradação dos polissacarídeos e aumento da concentração de compostos de degradação mais lenta, como os compostos fenólicos da lignina. Estes não sofreram decomposição completa na etapa da análise imediata em atmosfera inerte, justamente pelo caráter mais estável de suas estruturas.

## **5.4. APLICAÇÃO DO ADUBO ORGÂNICO**

A Figura 30 apresenta o desenvolvimento dos pés de feijão nos compartimentos com diferentes substratos. O termo acompanhado refere-se à utilização do composto orgânico gerado pelo processo de compostagem em leira que foi acompanhado, já o termo comercializado refere-se a utilização do composto orgânico que é vendido na feira orgânica do bloco A.



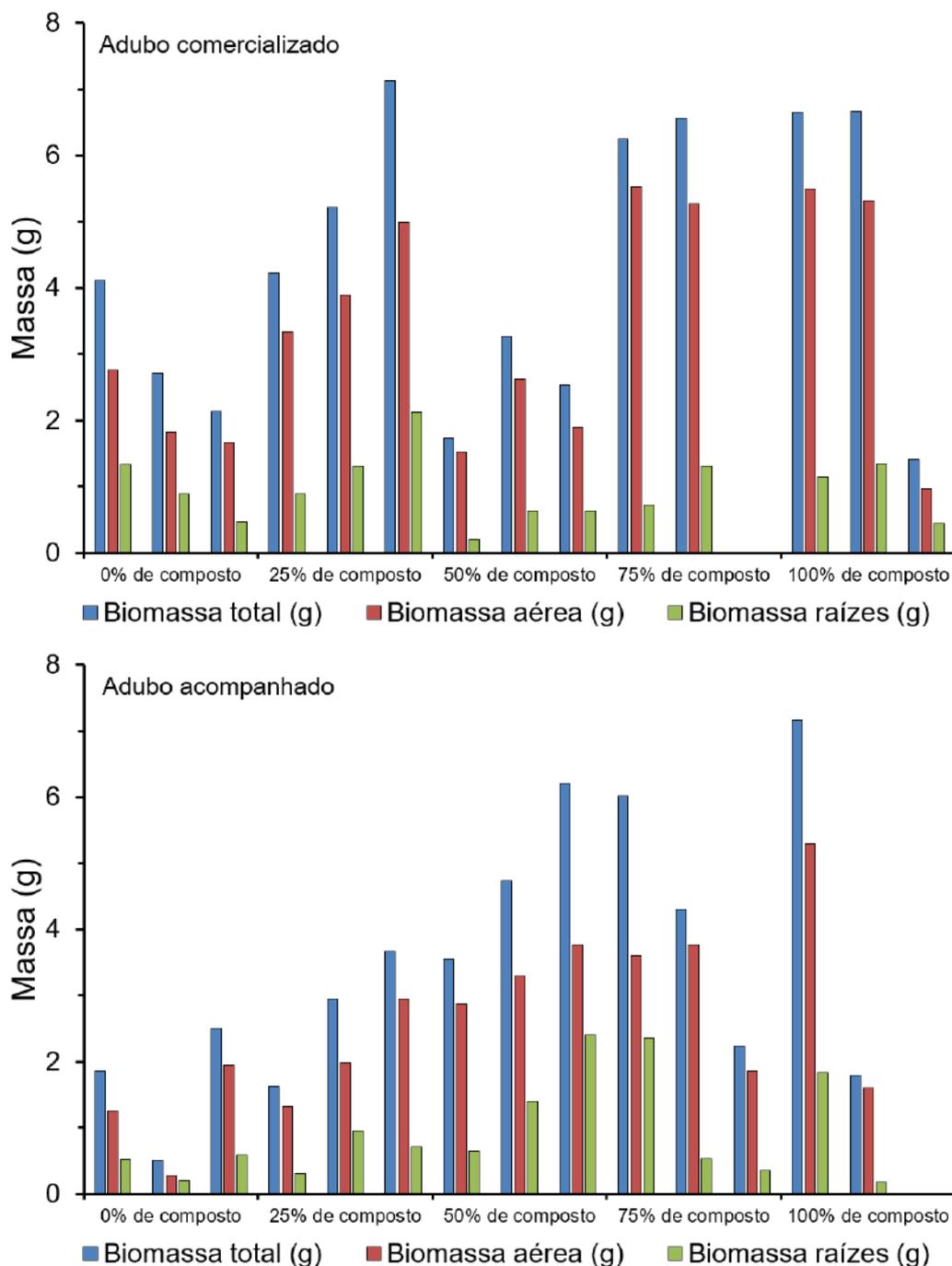
**Figura 30:** Desenvolvimento dos pés de feijão nos compartimentos com diferentes substratos.

No acompanhamento do processo que se iniciou dia 04/06/2018 e finalizou dia 05/07/2017, de um total trinta sementes utilizadas (15 referentes ao teste com substrato utilizando adubo orgânico acompanhado e 15 ao adubo comercializado), duas não germinaram. A primeira, referente ao substrato com 100% de composto orgânico acompanhado (uma semente não germinou de um total de três) e a segunda referente a utilização de 75% do adubo comercializado (uma semente não germinou de um total de três).

Essas perdas ocorreram por provável infestação por microorganismos, uma vez que foram utilizados percentuais de 100 e 75% de composto orgânico nos devidos substratos e em ambos os casos a semente apodreceu por ter sido atacada provavelmente por algum tipo de organismo existente no próprio composto (MEHTA et al., 2013).

No dia 05/07/2018, retiramos cuidadosamente os pés-de-feijão, já desenvolvidos, dos seus compartimentos da fôrma plástica e procedemos com a pesagem de suas massas referentes a totalidade da planta, sua parte aérea e raízes.

A Figura 31 apresenta a comparação mássica da biomassa total, biomassa da parte aérea e biomassa de raízes, as quais foram desenvolvidas pelos feijoeiros nos diferentes substratos.



**Figura 31:** Comparação mássica da biomassa total, biomassa da parte aérea e biomassa de raízes nos diferentes substratos.

Pelo perfil de comparação entre a formação de biomassa utilizando os dois compostos orgânicos apresentados na Figura 31, fica clara a evidência de que a utilização dos dois compostos orgânicos na composição dos substratos promoveu maior desenvolvimento de biomassa total e aérea nas plantas.

Levando em conta os maiores valores de massa para cada uma das triplicatas realizadas para o composto acompanhado, quanto maior foi o percentual de composto orgânico maior foi a massa de biomassa total e aérea desenvolvida por cada feijoeiro.

Em relação aos dados de biomassa de raiz, como os compartimentos das fôrmas utilizadas eram curtos, ocorreu déficit no crescimento das mesmas. Os maiores valores de massa referente a biomassa de raiz ocorreram para os casos de 25% de composto comercializado e 50% de composto acompanhado, o que também indica a ação fertilizante de ambos os compostos.

Como os sistemas que produzem maior quantidade de biomassa vegetal são mais férteis e apresentam maior possibilidade de manutenção da vida de forma sustentável (MAYER, 2009; AVILA; ASSAD; LIMA, 2012), recomenda-se a utilização dos dois compostos. No entanto, a princípio não basta somente aplicar o composto orgânico.

Somente quando um os compostos forem combinados com outras técnicas ecológicas de manejo, como rotação de culturas, adubação verde, sistemas de plantio direto na palha, pastoreio racional e sistemas agroflorestais, é que poderão contribuir para manutenção e aumento da fertilidade, ou seja, aumentar a capacidade do substrato (solo) de ceder nutrientes para as plantas (AVILA; ASSAD; LIMA, 2012).

#### **5.4.1. Análise Estatística**

Os dados utilizados na análise estatística são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7:** Dados utilizados na análise estatística.

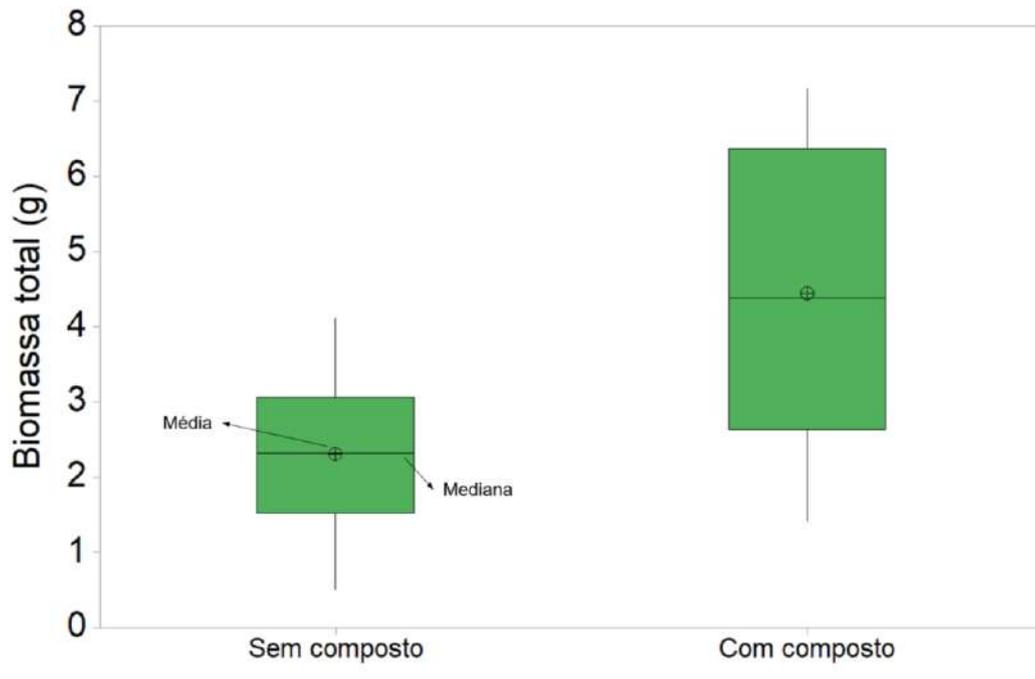
Percentual de composto orgânico	Adubo acompanhado			Adubo comercializado		
	Biomassa total (g)	Biomassa aérea (g)	Biomassa de raiz (g)	Biomassa total (g)	Biomassa aérea (g)	Biomassa de raiz (g)
0% de composto	1,86	1,26	0,52	4,11	2,76	1,34
	0,51	0,29	0,21	2,72	1,82	0,89
	2,51	1,94	0,59	2,14	1,66	0,47
25% de composto	1,63	1,32	0,30	4,23	3,33	0,90
	2,95	1,99	0,95	5,21	3,90	1,32
	3,67	2,96	0,71	7,13	4,99	2,13
50% de composto	3,55	2,88	0,65	1,73	1,52	0,21
	4,74	3,30	1,40	3,27	2,62	0,64
	6,21	3,77	2,40	2,53	1,89	0,64
75% de composto	6,02	3,60	2,36	6,24	5,52	0,72
	4,30	3,76	0,53	6,57	5,26	1,31
	2,23	1,86	0,36	6,41	5,39	1,02
100% de composto	7,17	5,30	1,83	6,65	5,50	1,15
	1,79	1,60	0,18	6,67	5,31	1,35
	4,48	3,45	1,01	1,42	0,97	0,44

Devido à ausência dos dados para o caso dos substratos com 100% de composto acompanhado e 75% de composto comercializado, utilizou-se a média dos dois demais valores obtidos em suas respectivas triplicadas.

#### 5.4.1.1. Comparação de substratos com e sem adição de composto orgânico

Inicialmente será feita a comparação dos substratos levando em consideração a presença ou ausência de composto orgânico, não diferenciando o tipo e percentual de composto utilizado. Deste modo, totalizaram-se seis valores para ausência de composto e 24 valores referentes a presença de composto, os quais serão comparados.

A Figura 32 apresenta as comparações da formação de biomassa total no feijoeiro em substratos com e sem adição de composto orgânico.



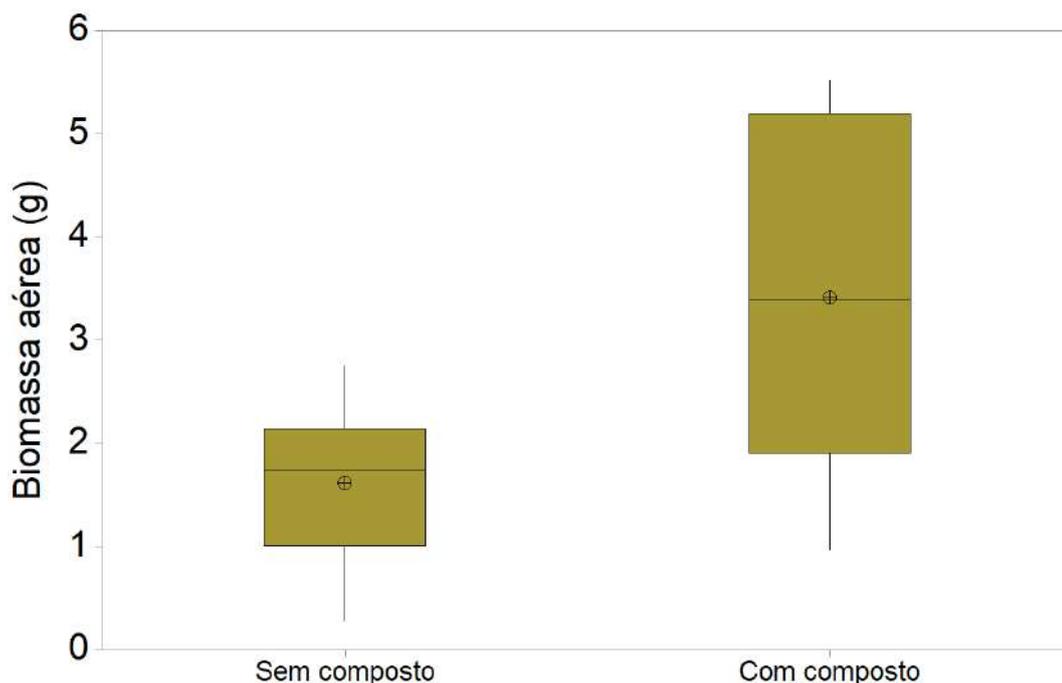
**Figura 32:** Comparações da formação de biomassa total no feijoeiro em substratos com e sem adição de composto orgânico.

Conforme podemos verificar na Figura 32, o desenvolvimento de biomassa total no feijoeiro foi mais acentuado no caso do substrato com adição de composto orgânico, o que pode ser verificado pela sua maior mediana e média em relação ao substrato sem composto.

Quanto a dispersão, o substrato com utilização de composto exibiu a maior variabilidade nos dados, apresentando intervalo interquartil de 3,73 g. Já o substrato sem composto apresentou menor intervalo interquartil (1,54 g), logo menor variabilidade nos dados.

Quanto a simetria, o conjunto de dados referentes ao substrato com ausência de composto teve a linha da mediana localizada praticamente no centro do retângulo, o que caracteriza esses dados como simétricos, já o substrato com presença de composto caracterizou-se por apresentar dados assimétricos positivos.

A Figura 33 apresenta as comparações da formação de biomassa aérea no feijoeiro em substratos com e sem adição de composto orgânico.



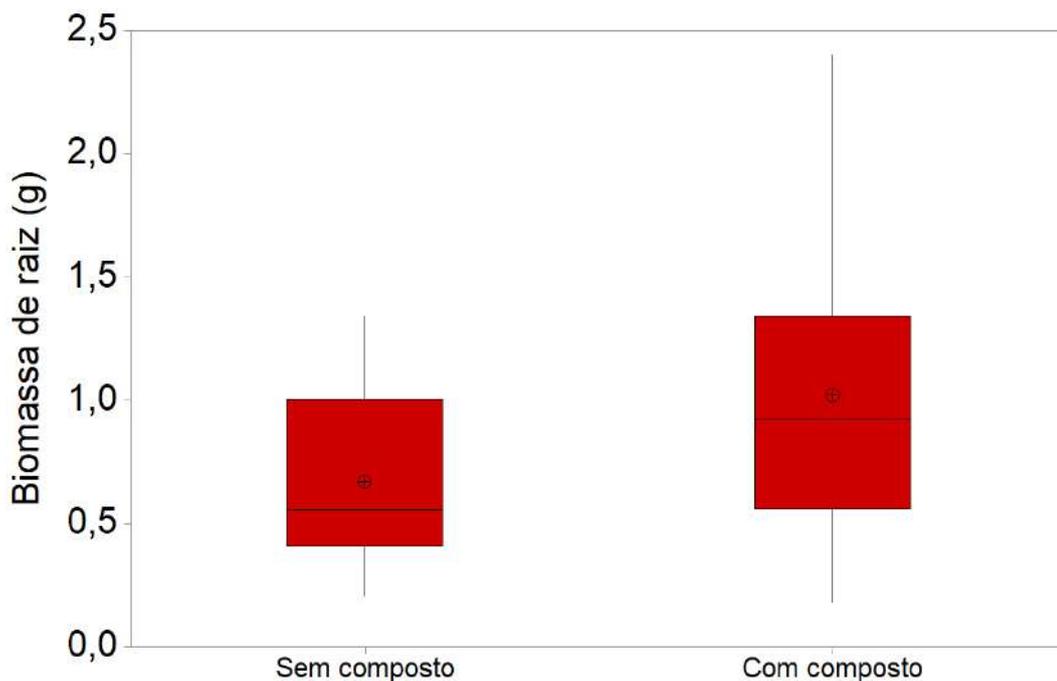
**Figura 33:** Comparações da formação de biomassa aérea no feijoeiro em substratos com e sem adição de composto orgânico.

Conforme podemos verificar na Figura 33, o desenvolvimento de biomassa aérea no feijoeiro foi mais acentuado no caso do substrato com adição de composto orgânico, o que pode ser verificado pela sua maior mediana e média em relação ao substrato sem composto.

Quanto a dispersão, o substrato com utilização de composto exibiu a maior variabilidade nos dados, apresentando intervalo interquartil de 3,28 g. Já o substrato sem composto apresentou menor intervalo interquartil (1,13 g), logo menor variabilidade nos dados.

Quanto a simetria, o conjunto de dados referentes ao substrato com composto teve a linha da mediana localizada praticamente no centro do retângulo, o que caracteriza esses dados como simétricos, já o substrato com ausência de composto caracterizou-se por apresentar dados assimétricos negativos.

A Figura 34 apresenta as comparações da formação de biomassa de raiz no feijoeiro em substratos com e sem adição de composto orgânico.



**Figura 34:** Comparações da formação de biomassa de raiz no feijoeiro em substratos com e sem adição de composto orgânico.

De acordo com a Figura 34, o desenvolvimento de biomassa de raiz no feijoeiro foi mais acentuado no caso do substrato com adição de composto orgânico, o que pode ser verificado pela sua maior mediana e média em relação ao substrato sem composto.

Quanto a dispersão, o substrato com utilização de composto exibiu a maior variabilidade nos dados, apresentando intervalo interquartil de 0,78 g. Já o substrato sem composto apresentou menor intervalo interquartil (0,60 g), logo menor variabilidade nos dados.

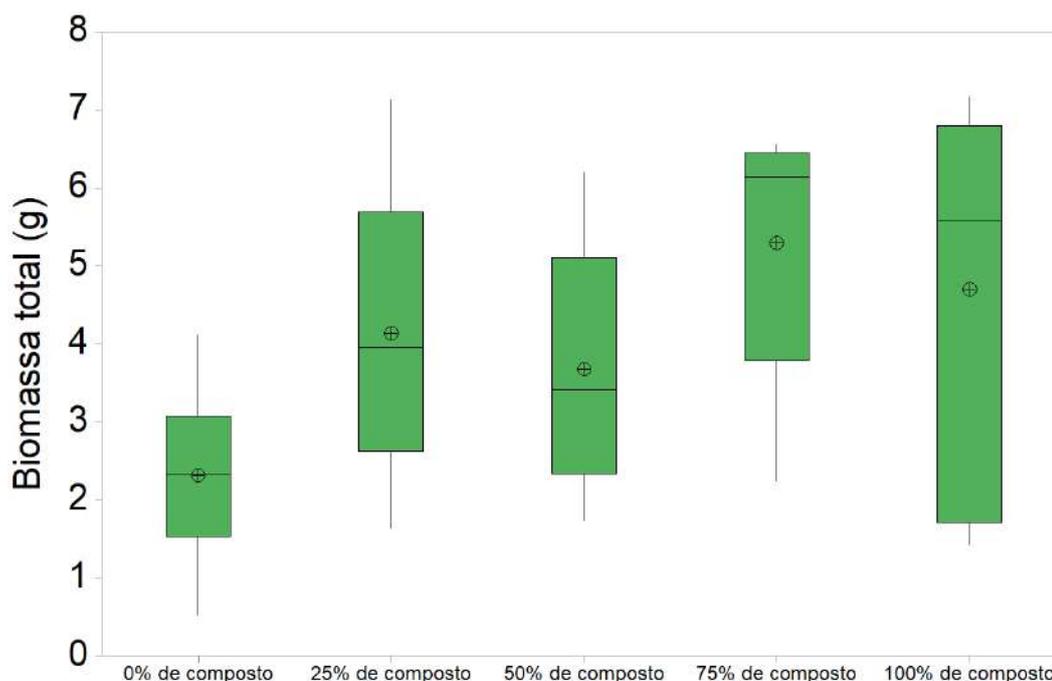
Quanto a simetria, o conjunto de dados referentes ao substrato com composto e sem composto caracterizaram-se por apresentar dados assimétricos positivos.

#### 5.4.1.2. Comparação de substratos com adição de composto orgânico em diversos percentuais

Dando seguimento a análise dos dados, os substratos também foram comparados levando em consideração a variação percentual de composto orgânico, não diferenciando o tipo (comercializado e acompanhado). Deste modo, serão levadas em consideração as duas triplicadas realizadas em cada percentual, totalizando a

comparação de seis valores para cada percentual (0, 25, 50, 75 e 100%) de composto adicionado na composição do substrato.

A Figura 35 apresenta as comparações dos substratos quanto a formação da totalidade de biomassa no feijoeiro.



**Figura 35:** Comparações da formação de biomassa total no feijoeiro em substratos com diferentes percentuais de composto.

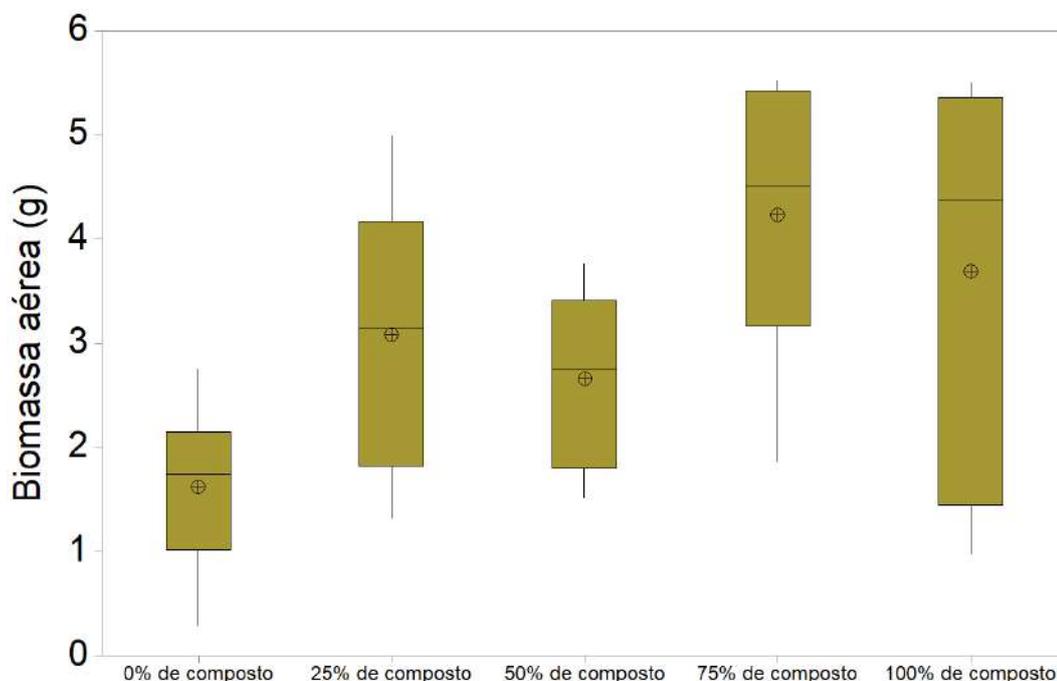
Conforme a Figura 35, podemos verificar que as médias e as medianas referentes aos substratos com adição de composto são todas superiores à média e mediana do substrato com ausência de composto (100% solo). O substrato com utilização de 75% de composto apresentou a maior média e mediana.

Quanto a dispersão, os substratos com utilização de 0% e 100% de composto exibiram respectivamente a menor e maior variabilidade nos dados, apresentando intervalos interquartilísticos de 1,55 g e 5,09 g. Já os substratos com utilização de 25, 50 e 75% de composto apresentaram similaridades quanto as suas variabilidades, computando intervalos interquartilísticos de respectivamente 3,07 g, 2,77 g e 2,67 g.

Quanto a simetria, o conjunto de dados referentes ao substrato com ausência de composto teve a linha da mediana localizada praticamente no centro do retângulo, o que caracteriza esses dados como simétricos. Todos os demais casos

apresentaram dados assimétricos, sendo os casos de 25 e 50% de composto classificados como assimétricos positivos e os de 75 e 100% assimétricos negativos.

A Figura 36 apresenta as comparações dos substratos quanto a formação de biomassa aérea no feijoeiro.

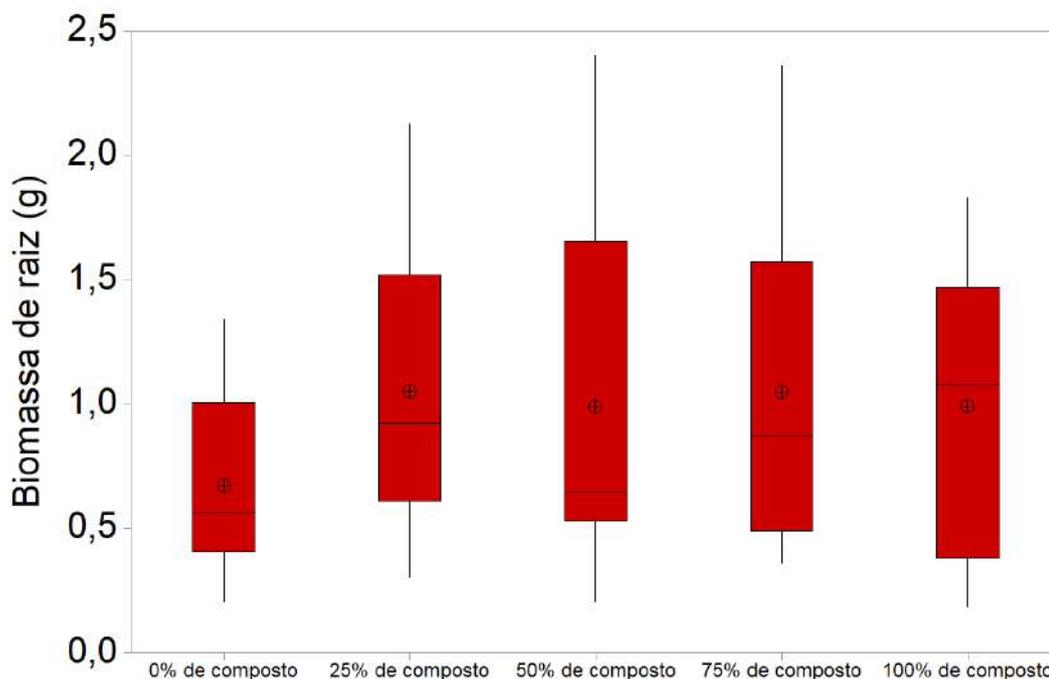


**Figura 36:** Comparações da formação de biomassa aérea no feijoeiro em substratos com diferentes percentuais de composto.

Conforme a Figura 36, podemos verificar que as médias e as medianas referentes aos substratos com adição de composto são todas superiores à média e mediana do substrato com ausência de composto (100% solo). O substrato com utilização de 75% de composto apresentou a maior média e mediana.

Quanto a dispersão, os substratos com utilização de 0% e 100% de composto exibiram respectivamente a menor e maior variabilidade nos dados, apresentando intervalos interquartilísticos de 1,13 g e 3,92 g. Já os substratos com utilização de 25 e 75% de composto apresentaram similaridades quanto as suas variabilidades, computando intervalos interquartilísticos de respectivamente 2,35 g e 2,26 g. Quanto a simetria, todos os casos apresentaram dados assimétricos negativos.

A Figura 37 apresenta as comparações dos substratos quanto a formação de biomassa de raiz no feijoeiro.



**Figura 37:** Comparações da formação de biomassa de raiz no feijoeiro em substratos com diferentes percentuais de composto.

De acordo com a Figura 37, podemos verificar que as médias e as medianas referentes aos substratos com adição de composto são todas superiores à média e mediana do substrato com ausência de composto (100% solo). Os substratos com utilização de 25 e 100% de composto apresentaram respectivamente a média e a maior mediana.

Quanto a dispersão, os substratos com utilização de 0% e 50% de composto exibiram respectivamente a menor e maior variabilidade nos dados, apresentando intervalos interquáliticos de 0,59 g e 1,12 g. Já os substratos com utilização de 50, 75 e 100% de composto apresentaram similaridades quanto as suas variabilidades, computando intervalos interquáliticos de respectivamente 1,12 g, 1,08 g e 1,09 g.

Quanto a simetria, todos os casos apresentaram dados assimétricos, sendo o caso de 100% de composto classificado como assimétrico negativo e os demais casos assimétricos positivos.

## 6. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos no estudo é possível concluir que:

O processo de compostagem por aeração passiva desenvolvido pelo grupo MUDA e acompanhado por esse trabalho é eficiente tendo em vista a produção de composto orgânico. Isso ocorre devido ao fato de ser um processo que agrega valor aos resíduos orgânicos e que é ambientalmente sustentável, uma vez que não terá sua disposição final em aterros sanitários, seguindo as recomendações de gestão ambiental segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos Brasileira.

As matérias-primas da compostagem, ou seja, as folhas e os restos de comida, além das misturas de diversas idades, apresentaram perfis de combustão e pirólise bastante semelhantes. Em ar, sofreram processos de perda de água e combustão dos seus principais constituintes como os polissacarídeos (amido, hemicelulose e celulose) e compostos fenólicos (lignina). Já em nitrogênio, apresentaram resumidamente a perda de água e decomposição dos polissacarídeos (em menor temperatura) e compostos fenólicos em maior temperatura.

Através da técnica de DRX das misturas inicial e final, verificou-se a mineralização dos resíduos em função da maior quantidade de picos identificadas pelos seus respectivos difratogramas, o que é típico em processos de compostagem.

Ao comparar os resultados obtidos pela análise térmica em nitrogênio das misturas de diferentes idades, observou-se que aquelas submetidas a prévia oxidação no processo de compostagem, tiveram reduzidos os seus percentuais de componentes orgânicos mais simples e de fácil degradação (amido, hemicelulose e celulose) e concentrados os componentes mais complexos e de difícil degradação (lignina).

Já a comparação das misturas de diferentes idades por análise térmica em ar, mostrou que a razão R entre as perdas de massa associadas à segunda e à primeira etapa de combustão é um parâmetro confiável para avaliar o nível de maturação da matéria orgânica nos compostos. Durante a compostagem, a razão R aumentou, revelando uma alta sensibilidade às mudanças químicas induzidas pela biotransformação de materiais orgânicos. A proporção foi 2 vezes maior para a amostra após 114 dias de compostagem do que para a amostra com 0 dias.

Usando a análise imediata, notou-se que o percentual crescente de carbono fixo nas misturas de maior idade retratou o efeito dado pela biodegradação dos polissacarídeos e aumento da concentração de compostos de degradação mais lenta, como os compostos fenólicos da lignina.

No processo de compostagem em bombona de 200 L, o perfil de temperatura apresentou períodos de 5 dias de fase mesofílica e 40 dias de fase termofílica, valores próximos aos encontrados na literatura para processos de compostagem de resíduos orgânicos.

Por fim, estatisticamente, a aplicação do composto orgânico acompanhado (mistura final) e composto comercializado como constituinte em substratos para cultivo de feijão mostrou-se vantajosa, dados os maiores valores de biomassa total, aérea e de raízes desenvolvidos pela planta.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRATEC. **Sessão nomenclatura em análise térmica e calorimetria.** In: **VII Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria.** Associação Brasileira de Análise Térmica e Calorimetria. Campos do Jordão, São Paulo, p. 10, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Classificação de Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

AVILA, J. E. T.; ASSAD, M. L. L.; LIMA, A. S. **Avaliação de biomassa vegetal em sistema de produção em transição agroecológica.** Revista Brasileira de Agroecologia. V. 7, n.3, p. 72-84, 2012.

BERNABÉ, G.A.; KOBELNIK, M.; ALMEIDA, S.; RIBEIRO, C.A.; Crespi, M.S. **Thermal behavior of lignin and cellulose from waste composting process.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013.

BIKOVENS, O.; DIZHBITE, T.; TELYSHEVA, G. **Characterisation of humic substances formed during co-composting of grass and wood wastes with animal grease.** Environmental Technology, 2012.

BLANCO, M-J.; ALMENDROS, G. **Chemical transformation, phytotoxicity and nutrient availability in progressive composting stages of wheat straw.** Plant and Soil, V. 196, p. 15–25, 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília, DF, 2012.

CAMPOS, A. L.G.; MELLO FILHO, F.S.; CARVALHO, L.S L.S. **Política Nacional e Gestão Municipal de Resíduos Sólidos.** FGV Projetos, 2015.

CARICASOLE, P.; PROVENZANO, M.R.; HATCHER, P.G.; SENESI, N. Evolution of organic matter during composting of different organic wastes assessed by CPMAS C-13 NMR spectroscopy. Waste Manage, 2011.

CHENG, Q.Y.; GUO, S.S.; AI, W.D.; TANG, Y.K.; Qin, L.F. **A straw-soil co-composting and evaluation for plant substrate in BLSS.** Advances in Space Research, 2013.

DARÉ, D. - **Estudo térmico, caracterização e análise de compostos orgânicos em amostras de lodo de esgoto das cidade de São Carlos-SP e Jaú-SP.** Universidade Estadual Paulista, 2013.

DE BERTOLDI, M. **Composting in the European Union.** BioCycle, 1998.

DELL'ABATE, M.T.; BENEDETTI, A.; SEQUI, P. **Thermal Methods of Organic Matter Maturation Monitoring During a Composting Process.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, p. 389-396, 2000.

DENARI, G.B., CAVALHEIRO, E.T.G. - **Princípios e aplicações de análises térmicas**. Universidade de São Paulo Instituto de Química de São Carlos, 2012.

DWECK, J. **Qualitative and quantitative characterization of Brazilian natural and organophilic clays by thermal analysis**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 92, n. 1, p. 129-135, 2008.

DWECK, J. **Thermal analysis fundamentals and applications on pollution control. In: IV International conference on pollution prevention and control**. São Paulo, 2010.

DWECK, J.; DA CUNHA, A.L.C.; PINTO, C.A.; GONÇALVES, J.P.; BÜCHLER, P.M. **Thermogravimetry on calcined mass basis – hydrated cement phases and pozzolanic activity quantitative analysis**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 97, 2009.

ELDOR, A., P. **Soil microbiology, ecology, and biochemistry**. Fourth edition, 2015.

European Commission. **Eurostat: Your key to European statistics**. Disponível em <<http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>>. Acessado em: 20 mai. 2018.

FARIAS, A. M. L. **O Boxplot**. Universidade Federal Fluminense, Departamento de Estatística. Disponível em: <<http://www.uff.br/cdme/conheceboxplot/conheceboxplot.html/boxplot.pdf>>, Acessado em: 10 jun. 2018.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual Prático para Compostagem de Biossólidos**. 1a Edição. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

FERREIRA, V.F.; ROCHA, D. R.; SILVA, F. C. **Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares**. Química Nova, vol.32, no.3, São Paulo, 2009.

GOTAAS, HB. **Composting: sanitary disposal and reclamation of organic wastes**. Geneva: World Health Organization; 1956.

GOYAL, S.; DHULL, S. K.; KAPPOR, K. K. **Chemical and biological changes during composting of different organic wastes and assessment of compost maturity**. Bioresource Technology. V.96, p. 1584–1591, 2005.

GUO, R.; LI, G.; JIANG, T.; SCHUCHARDT, F.; CHEN, T.; ZHAO, Y.; SHEN, Y. **Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost**. Bioresource Technology, Elmsford, v. 112, 2012.

HACHICHA, R.; REKIK, O.; HACHICHA, S.; FERCHICHI, M.; WOODWARD, S.; MONCEF, N.; CEGARRA, J.; MECHICHI, T. **Co-composting of spent coffee ground with olive mill wastewater sludge and poultry manure and effect of Trametes versicolor inoculation on the compost maturity**. Chemosphere, 2012.

HE, X.S.; XI, B.D.; JIANG, Y.H.; HE, L.S.; LI, D.; PAN, H.W.; BAI, S.G. **Structural transformation study of water-extractable organic matter during the industrial composting of cattle manure**. Microchemical Journal, 2013.

HUANG, D.L.; ZENG, G.M.; FENG, C.L.; HU, S.; LAI, C.; ZHAO, M.H.; SU, F.F.; TANG, L.; Liu, H.L. **Changes of microbial population structure related to lignin degradation during lignocellulosic waste composting.** Bioresource Technology, 2010.

HUBBE M.A.; NAZHAD M.; SANCHEZ C. **Composting as a way to convert cellulosic biomass and organic waste into high-value soil amendments: a review.** BioResources, 2010.

IONASHIRO, M.; CAIRES, F. J.; GOMES, D. J. C. **Giolito: Fundamentos da termogravimetria e análise térmica diferencial.** Giz Editorial, 2 ed, São Paulo, 2014.

IWAI, H.; FUKUSHIMA, M.; YAMAMOTO, M.; KOMAI, T.; KAWABE, Y. **Characterization of seawater extractable organic matter from bark compost by TMAH-py-GC/MS.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013.

JUCA, J.F.T.; CASTILHOS JÚNIOR, A.B.; MARIANO, M.O.H. **Política de Resíduos Sólidos do Brasil: Proposta de um plano estratégico para o desenvolvimento de políticas estaduais de gestão integrada de resíduos sólidos.** Revista da Associação Portuguesa de Engenharia Sanitária Ambiental, 2007.

KARADAG, D.; OZKAYA, B.; OLMEZ, E.; NISSILA, M.E.; CAKMAKCI, M.; YILDIZ, S.; PUHAKKA, J.A. **Profiling of bacterial community in a full-scale aerobic composting plant.** International Biodeterioration & Biodegradation, 2013.

KAUSAR, H.; SARIAH, M.; SAUD, H.M.; ALAM, M.Z.; ISMAIL, M.R. **Development of compatible lignocellulolytic fungal consortium for rapid composting of rice straw.** International Biodeterioration & Biodegradation, 2010.

KHALIL, R. A.; MESZAROS, E.; GRONLI, M. G.; VÁRHEGYI, G.; MOHAI, I.; MAROSVOLGYI, B.; HUSTAD, J. E. **Thermal analysis of energy crops Part I: the applicability of a macro-thermobalance for biomass studies.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 81, p. 52-59, 2008.

LEVER, T.; HAINES, P.; ROUQUEROL, J.; CHARLESLEY, E.L.; ECKEREN, P.V.; BURLETT, D.J. **Pure & Applied Chemistry.** ICTAC nomenclature of thermal analysis, 2014.

LUZ CAYUELA, M.; SANCHEZ-MONEDERO, M.A.; ROIG, A.; SINICCO, T.; MONDINI, C. **Biochemical changes and GHG emissions during composting of lignocellulosic residues with different N-rich by-products.** Chemosphere, 2012.

MARHUENDA-EGEA, F. C.; MARTÍNEZ-SABATER, E.; JORDÁ, J.; SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, S.; MORAL, R.; BUSTAMANTE, M. A.; PAREDES, C.; PÉREZ-MURCIA, M. D. **Evaluation of the aerobic composting process of winery and distillery residues by thermal methods.** Thermochimica Acta, V. 454, p. 135-143, 2007.

MASSUKADO, L. M. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares.** Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

MAYER, P. H. **Fertilidade do sistema agrícola: um estudo de 3 comunidades da região metropolitana de Curitiba – PR.** Tese (Doutorado em Meio ambiente e desenvolvimento), Universidade Federal do Paraná, p. 210, 2009.

MAYORAL, M. C.; IZQUIERDO, M. T.; ANDRÉS, J. M.; RUBIO, B. **Different approaches to proximate analysis by thermogravimetry analysis.** *Thermochim. Acta*, v. 370, p. 91-97, 2001.

MEHTA, C.M.; PALNI, U.; FRANKE-WHITTLE, I.H.; SHARMA, A.K. **Compost: its role, mechanism and impact on reducing soil-borne plant diseases.** *Waste Manage*, 2013.

ORFAO, J.; ANTUNES, F.; FIQUEIREDO, J. **Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reaction model.** *Fuel*, v. 78, p. 349–58, 1999.

PARADELO, R.; MOLDES, A.B.; BARRAL, M.T. **Evolution of organic matter during the mesophilic composting of lignocellulosic winery wastes.** *Journal of Environmental Management*, 2013.

PARR, J.F.; HORNICK, S.B. **Agricultural use of organic amendments: a historical perspective.** *American Journal of Alternative Agriculture*, 1991.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de Compostagem.** Belo Horizonte: UNICEF, 1996.

PERES, F.; MOREIRA, J.C. **Saúde e Ambiente em sua relação com o consumo de agrotóxicos em pólo agrícola de estado de Rio de Janeiro, Brasil.** Rio de Janeiro, RJ, 2007.

PERTEL, M. **CT Verde – Projeto Composta CT.** Primeiro Fórum Verde da UFRJ. 8 slides. 2017.

PIETRO, M.; PAOLA, C. **Thermal analysis for the evaluation of the organic matter evolution during municipal solid waste aerobic composting process.** *Thermochimica Acta*, v. 413, p. 209-214, 2004.

PLATT, B.; GOLDSTEIN, N.; COKER, C. **State of Composting in the US: What, Why, Where & How.** Institute for Local Self-Reliance, 2014.

RABINOVICH, M.; BOLOBOVA, A.; VASIL'CHENKO, L. **Fungal decomposition of natural aromatic structures and xenobiotics: a review.** *Appl. Biochem. Microbiol.* 40, 1–17, 2014.

RAVEENDRAN, K.; GANESH, A.; KHILAR, K. C. **Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components.** *Fuel*, v. 75, p. 987–98, 1996.

RAZALI, W.A.W.; BAHARUDDIN, A.S.; TARMEZEETALIB, A.; SULAIMAN, A.; NAIM, M.N.; HASSAN, M.A.; SHIRAI, Y. **Degradation of oil palm empty fruit bunches (OPEFB) fibre during composting process using in-vessel composter.** *BioResources*, 2012.

ROSSI, M.R.P.S. **Compostagem de resíduos sólidos orgânicos em escola de educação básica de caraguatatuba – SP.** Fernandópolis, SP, 2015.

RYCKEBOER, J.; MERGAERT, J.; VAES, K.; KLAMMER, S.; DE CLERCQ, D.; COOSEMANS, J.; INSAM, H.; SWINGS, J. **A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes.** Annals of Microbiology, 2003.

SCHALCH, V; ALMEIDA, L.W.C; GOMES, L.P. **Curso sobre gerenciamento de resíduos sólidos.**São Carlos, nd.

SILVA, C.A.; ANDREOLI C.V. **Compostagem como alternativa a disposição final dos resíduos sólidos gerados na ceasa Curitiba/PR.** Espírito Santo do Pinhal, 2010.

THOMAS, G.V.; PALANISWAMI, C.; PRABHU, S.R.; GOPAL, M.; GUPTA, A. **Co-composting of coconut coir pith with solid poultry manure.** Current Sci, 2013.

VAN ELSAS, J., D.; JANSSON, J., K.; TREVORS, J., T. **Modern soil microbiology.** 2nd ed, page 10. New York:CRC; London:Taylor & Francis, 2007.

VIANA, M. M. **Obtenção e utilização de produtos de pirólise do lodo de esgoto para adsorção de poluentes em meio aquoso.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

WANG, L.P.; SHEN, Q.R.; YU G.H.; RAN, W.; XU, Y.C. **Fate of biopolymers during rapeseed meal and wheat bran composting as studied by two-dimensional correlation spectroscopy in combination with multiple fluorescence labeling techniques.** Bioresources Technology, 2012a.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H. **Characteristics of hemicelulose, cellulose and lignina pyrolysis.** Fuel, v. 86, p. 1781-88, 2007.

ZANETTE, P.H.O. **Compostagem dos Resíduos Orgânicos do Restaurante Universitário do Campus 2 da USP São Carlos - Balanço do funcionamento inicial e propostas de melhorias.** São Carlos, SP, 2015.

ZHAO L.; WANG X.Y.; GU W.M.; SHAO L.M.; HE P.J. **Distribution of C and N in soluble fractionations for characterizing the respective biodegradation of sludge and bulking agents.** Bioresour Technol, 2011b.

ZHAO, L.; GU W.M.; HE P.J.; SHAO L.M. **Biodegradation potential of bulking agents used in sludge bio-drying and their contribution to bio-generated heat.** Water Res, 2011a.