

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
HIDRÁULICA E SANEAMENTO

JONATAS FERNANDES MARQUES

**Avaliação da viabilidade da compostagem de resíduos sólidos  
urbanos e de lodo de esgoto para a produção de fertilizantes  
orgânicos no município de São Carlos**

Versão Corrigida

São Carlos - SP  
2022



JONATAS FERNANDES MARQUES

**Avaliação da viabilidade da compostagem de resíduos sólidos  
urbanos e de lodo de esgoto para a produção de fertilizantes  
orgânicos no município de São Carlos**

Versão Corrigida

Dissertação apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Sênior. Valdir Schalch

São Carlos - SP

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M357a Marques, Jonatas Fernandes  
Avaliação da viabilidade da compostagem de resíduos sólidos urbanos e de lodo de esgoto para a produção de fertilizantes orgânicos no município de São Carlos / Jonatas Fernandes Marques; orientador Valdir Schalch. São Carlos, 2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. sistema centralizado. 2. windrow. 3. aproveitamento. 4. dimensionamento. 5. matéria-prima.  
I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JONATAS FERNANDES MARQUES**.

Título da dissertação: "Avaliação da viabilidade da compostagem de resíduos sólidos urbanos e de lodo de esgoto para a produção de fertilizantes orgânicos no município de São Carlos".

Data da defesa: 24/02/2022.

### Comissão Julgadora

### Resultado

Prof. Associado **Valdir Schalch**  
**(Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

APROVADO

Prof. Dr. **Marco Aurélio Soares de Castro**  
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Dr. **Mario Augusto Tavares Russo**  
(Universidade do Minho/UMINHO-Portugal)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. **Luiz Antonio Daniel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**



## **DEDICATÓRIA**

A todos aqueles que se recusam a ver seu lixo enterrado a quilômetros de distância sem serventia, mas colocam suas cascas, frutas, legumes, talos, e pó de café no experimento científico mais fascinante de todos: a compostagem.



## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, pelo apoio, dedicação e incentivo em todo o tempo.

À Universidade de São Paulo, ao Departamento de Hidráulica e Saneamento, e a todos os seus servidores públicos.

Aos amigos e amigas do NEPER, por todas as conversas, debates e encontros que tornam a pós-graduação muito mais rica, e especialmente a Kleber, Fernando, Lorena e Dayane, que empenharam suas mãos e suor em todos os momentos que precisei de ajuda.

Ao meu orientador, prof. Valdir Schalch, pela oportunidade de colaborar com para o desenvolvimento da área de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos.

Ao pesquisador da Embrapa, Dr. Wilson Tadeu Lopes da Silva, pelos conselhos, pelo exemplo, e pelas discussões sobre a ciência por trás da compostagem.



## **EPÍGRAFE**

Não existe compostagem com menos de 100 dias.

- Edmar Kiehl



## RESUMO

MARQUES, J. F. **Avaliação da viabilidade da compostagem de resíduos sólidos urbanos e de lodo de esgoto para a produção de fertilizantes orgânicos no município de São Carlos.** 2022. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2022.

Todos os dias, dezenas de milhões de toneladas de resíduos sólidos são enterrados em aterros e lixões por todo o Brasil. Sendo que a maior parte desse montante é constituído de resíduos orgânicos que tem potencial para serem aproveitados através da compostagem na produção de fertilizantes orgânicos e, assim, minimizar os impactos ambientais negativos da sua disposição em aterros sanitários. Nessa perspectiva, foi realizado um estudo com o objetivo de avaliar a viabilidade da produção de fertilizante orgânico por meio da compostagem do lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto doméstico e da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos no município de São Carlos, um município de médio porte no interior do Estado de São Paulo. Para isso foi realizada a compostagem em laboratório utilizando essas matérias primas, avaliado os parâmetros físico-químicos do composto obtido e foi também elaborada uma proposta de uma usina de compostagem a ser operada no município visando o cumprimento de metas e objetivos do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de São Carlos, elaborado em 2020. De acordo com os resultados, a compostagem com revolvimento mecânico apresentou boas condições de temperatura e umidade que atendem aos processos mínimos de redução de patógenos especificados na CONAMA 375/06. Foi possível obter um fertilizante orgânico com os teores mínimos de nitrogênio e carbono especificados na IN SDA nº 25/2009, do MAPA, com uma porcentagem em torno de 3 % (base seca) para nitrogênio. Para a produção desse fertilizante, a proposta indica a necessidade de uma área mínima de 1,1 a 1,9 hectares, dependendo do tipo de equipamento de revolvimento, com capacidade para processar de 20,4 toneladas de resíduos por dia, nos primeiros anos da implementação da usina, até 60,5 toneladas, no final do planejamento, de acordo com as metas do PMGIRS. Reconhece-se as limitações e complexidades dos estudos sobre a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, por isso, diretrizes e sugestões são apontadas para novos estudos que buscam avançar no tema.

**Palavras-chave:** sistema centralizado, windrow, reciclagem, dimensionamento, composto orgânico.



## ABSTRACT

MARQUES, J. F. **Evaluation of the viability of composting using urban solid waste and sewage sludge for the production of organic fertilizer in the city of São Carlos.** 2022. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2022.

Every day, tens of millions of tons of solid waste are buried in landfills or illegal dumps in Brazil. Nearly Half of this amount of waste has the potential to be used in composting aiming to produce organic fertilizers and reduce the negative environmental impacts of the waste disposal. Considering this context, it was done a study with the objective of evaluating the viability of organic fertilizer production using the composting process of domestic sewage sludge and the organic fraction of municipal solid waste from São Carlos, a medium municipality in the State of São Paulo. These materials were collected and composted in laboratory, the physical-chemical parameters were analyzed, and it was elaborated a proposal of a composting plant in São Carlos aiming the achievement of goals established by the municipal solid waste management plan (MSWMP). According to the results of this study it is possible to obtain stabilized compost which meets the minimum requirements for pathogens elimination and also have 3 % of nitrogen (dry mass). For this production, the municipality must provide a minimum area of 1,1 up to 1,9 acres for the installation of the composting plant, depending on the windrow equipment. According to the MSWMP, the plant should be able to process 20,4 tons of waste per day and increase the number up to 60,5 tons. It is recognized the limitations and complexities of a study on waste management, that is why suggestions and directions are presented for new studies that can contribute to the theme.

**Keywords:** centralized system, windrow, recycling, design, organic compost.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de sistema de leiras revolvidas na unidade de compostagem da empresa “Tera Ambiental” no município de Jundiaí, no Estado de São Paulo. ....	10
Figura 2 – Fluxograma de trabalho na etapa de experimentação com a compostagem. ....	16
Figura 3 – Desenho no AutoCAD das baias de compostagem. ....	17
Figura 4 – Construção das baias de compostagem. ....	17
Figura 5 – Armazenagem externa de resíduos de poda e limpeza de áreas verdes do campus. ....	18
Figura 6 – Armazenagem interna de resíduos de poda e limpeza de áreas verdes da universidade. ....	19
Figura 7 – Armazenagem nas baias de compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos coletada no supermercado. ....	20
Figura 8 – Armazenagem nas baias de compostagem dos resíduos do restaurante da fábrica. ....	20
Figura 9 – Vista de cima da rosca sem fim transportando lodo de esgoto na ETE Monjolinho. ....	21
Figura 10 – Procedimento de coleta de lodo na ETE Monjolinho. ....	21
Figura 11 - Armazenagem do lodo. ....	22
Figura 12 - Triturador Trapp modelo TR200 com 1,5 cv de potência. ....	23
Figura 13 – Armazenagem de resíduos triturados pré-montagem das leiras. ....	23
Figura 14 – Acondicionamento de resíduos de restos de alimentos (triturados). ....	24
Figura 15 – Sequência de montagem das leiras de compostagem. ....	25
Figura 16 – Execução da montagem da leira de compostagem. ....	25
Figura 17 – Pesagem das porções de resíduos adicionadas às camadas de montagem das leiras. ....	26
Figura 18 - Execução do procedimento de revolvimento. ....	27
Figura 19 - Sensor termopar acoplado a haste de metal para aferição de temperatura. ....	28
Figura 20 – Posicionamento dos sensores de temperatura na leira. ....	29
Figura 21 – Aparato para determinação da capacidade de retenção de água – CRA. ....	34
Figura 22 – Determinação da densidade aparente pelo método do balde. ....	34
Figura 23 – Detalhe do uso das bombonas de leite na coleta de lodo na ETE. ....	37
Figura 24 – Resíduos de poda e capina antes e depois do processo de trituração. ....	37

Figura 25 – Gráfico da temperatura diária das leiras ao longo dos 120 dias de compostagem. .....	40
Figura 26 – Temperatura média diária das leiras de compostagem. ....	42
Figura 27 – Média móvel simples de 5 dias da temperatura das leiras.....	43
Figura 28 – Umidade relativa das leiras durante o processo de compostagem.....	44
Figura 29 – Execução do teste rápido para verificar nível de umidade. ....	45
Figura 30 - Correção da umidade com adição de água durante os revolvimentos.....	46
Figura 31 – Água na leira 3 escorre pelo fundo da leira. ....	46
Figura 32 – Formação de “bolas” de lodo.....	49
Figura 33 – “Bola” de lodo quebrada ao meio com as mãos usando luvas de proteção.....	49
Figura 34 – Impurezas retiradas dos resíduos de poda e limpeza de áreas verdes do campus. .....	51
Figura 35 – Destaque para alguns itens encontrados entre as impurezas dos resíduos de poda. .....	52
Figura 36 – Impurezas encontradas no lodo de ETE. ....	53
Figura 37 – Montes de folhas com plástico dentro do campus da USP São Carlos. ....	54
Figura 38 – Resíduos sólidos encontrados em terreno às margens da Avenida Trabalhador Sancarlense próximo da entrada do campus da USP São Carlos.....	54
Figura 39 – Aspecto do composto final já peneirado.....	56
Figura 40 – Dimensões das leiras de seção trapezoidal. ....	64
Figura 41 – Gráfico das áreas de compostagem. ....	66
Figura 42 – Proposta de localização da usina de compostagem por revolvimento tracionado nos limites do aterro sanitário de São Carlos. ....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros para caracterização de lodo de esgoto e produtos derivados de acordo com a Resolução CONAMA 375/2006.....	13
Tabela 2 – Composição das leiras de compostagem.....	26
Tabela 3 – Caracterização dos resíduos de partida (matéria prima). ....	38
Tabela 4 – Densidade média aparente dos resíduos.....	39
Tabela 5 – Índices de temperatura média, mínima e máxima durante o todo o período de compostagem. ....	41
Tabela 6 – Índices de temperatura da média móvel simples de cinco dias.....	44
Tabela 7 – Determinação da densidade aparente das leiras pelo método do cilindro volumétrico. ....	47
Tabela 8 – Densidade do composto final. ....	48
Tabela 9 – Umidade e CRA do composto final.....	50
Tabela 10 – Resultados da Análise Elementar. ....	55
Tabela 11 – Pesagem ante e depois do peneiramento. ....	57
Tabela 12 – Dados sobre população e geração de resíduos sólidos.....	58
Tabela 13 – Resíduos gerados nos serviços de limpeza urbana em São Carlos – SP. ....	59
Tabela 14 – Metas de redução da disposição final de resíduos orgânicos em aterros no município de São Carlos. ....	59
Tabela 15 - Resultados para as estimativas de geração per capita de resíduos sólidos.....	60
Tabela 16 – Relação entre os resíduos com potencial para compostagem e as metas de redução da destinação em aterros. ....	62
Tabela 17 – Quantidades de resíduos desviadas para a compostagem. ....	63
Tabela 18 – Dimensões das leiras de compostagem de acordo com o equipamento de revolvimento. ....	64
Tabela 19 – Área ocupada pela leira formada pela entrada diária de resíduos.....	65
Tabela 20 – Áreas requeridas para o processo de compostagem em função das etapas do planejamento. ....	65
Tabela 21 – Estimativas sobre a produção de composto e material grosseiro no final da compostagem. ....	67

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - As principais referências legais nacionais atualmente em vigor aplicáveis à reciclagem de resíduos orgânicos.....	11
Quadro 2 – Parâmetros físico-químicos utilizados no experimento laboratorial.....	30
Quadro 3 – Lista de equipamentos usados em usinas de compostagem. ....	70

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Objetivos.....	3
3	Revisão da literatura .....	4
	3.1 Processo de compostagem de resíduos .....	4
	3.1.1 Parâmetros que regem o processo de compostagem .....	6
	3.2 Classificação do processo de compostagem.....	9
	3.3 Composto orgânico, suas aplicações e requisitos de qualidade .....	10
	3.4 Gestão de resíduos sólidos em São Carlos .....	14
4	Material e métodos .....	16
	4.1 Descrição do processo de compostagem.....	16
	4.1.1 Construção das baias de compostagem .....	16
	4.1.2 Coleta de resíduos .....	18
	4.1.3 Preparação dos resíduos .....	22
	4.1.4 Montagem das leiras de compostagem.....	24
	4.1.5 Operação da compostagem.....	27
	4.2 Análise dos parâmetros físico-químicos .....	29
	4.2.1 Coleta e preparação de amostras .....	30
	4.2.2 pH .....	31
	4.2.3 Umidade .....	32
	4.2.4 Matéria orgânica (Sólidos Voláteis) .....	32
	4.2.5 Carbono e nitrogênio .....	32
	4.2.6 Capacidade de retenção de água (CRA).....	32

4.2.7	Densidade aparente.....	34
4.3	Elaboração de uma proposta de usina de compostagem .....	35
5	Resultados e discussões .....	36
5.1	Resultados experimentais .....	36
5.1.1	Considerações sobre os métodos de coleta e preparação dos resíduos	36
5.1.2	Caracterização dos resíduos.....	38
5.1.3	Temperatura das leiras .....	40
5.1.4	Umidade das leiras.....	44
5.1.5	Densidades.....	47
5.1.6	Umidade e capacidade de retenção de água – CRA do composto.....	50
5.1.7	Impurezas nos resíduos.....	50
5.1.8	Nutrientes no composto .....	55
5.1.9	Peneiramento .....	56
5.2	Avaliação da viabilidade da proposta de compostagem .....	57
5.2.1	Estimativas das quantidades de resíduos sólidos.....	58
5.2.2	Definição das etapas de instalação da usina de compostagem .....	62
5.2.3	Dimensionamento da área de compostagem .....	63
5.2.4	Estimativas da produção de composto.....	67
5.2.5	Localização da usina de compostagem.....	68
5.2.6	Lista de equipamentos .....	70
6	Considerações finais .....	74
	Referências.....	77
	Apêndice A.....	83

# 1 INTRODUÇÃO

A população mundial já alcançou a marca de 7 bilhões de pessoas e continuará crescendo até 9,8 bilhões de pessoas até 2050 (UNITED NATIONS, 2017). Uma população cada vez mais urbana, assumindo padrões de consumo acelerado que leva a uma degradação intensa do meio ambiente. Na década de 1960, o pesquisador romeno Nicholas Georgescu-Roegen não logrou êxito ao advertir seus colegas economistas sobre a finitude dos recursos naturais e da necessidade de colocar o consumo e a geração de resíduos em uma economia circular, um ciclo virtuoso, onde os resíduos são vistos como recursos para a produção de novos bens e serviços (CECHIN, 2010). As ideias que o condenaram ao ostracismo só encontraram ressonância décadas depois com o aumento das evidências científicas sobre a ação humana sobre o aquecimento global e a mobilização internacional por ações em prol do desenvolvimento sustentável (SACHS, 2000; VEIGA, 2008).

Mesmo assim, apesar das mais recentes advertências da comunidade científica, a desconstrução deste padrão de desperdício continua sendo um grande desafio para gestão das cidades. Os aterros sanitários e os lixões ainda são as formas de destinação mais adotadas nos países da América Latina (MARGALLO et al., 2019). Só no Brasil, em 2020, foram dispostos nesses locais pelo menos 76 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2021, p. 22).

No caso de São Carlos, um município de médio porte no interior do estado de São Paulo, com uma população de aproximadamente 246 mil pessoas, mais de 186 toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) são gerados por dia, incluindo a FORSU, que é disposta sem distinção em um aterro sanitário a 20 km da área urbana.

Aproximadamente, metade desse montante que corresponde a chamada fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) poderia ser reciclada com a finalidade de diminuir os passivos ambientais dessas formas de disposição. Em termos de desempenho ambiental, quando os aterros sanitários são comparados com outras tecnologias de destinação de resíduos, eles se comportam de forma bastante semelhante aos incineradores, e há outras tecnologias com desempenho ambiental superior como a compostagem, a digestão anaeróbia (ou biometanização) e o tratamento mecânico biológico – assim apontam os estudos que utilizam técnicas de avaliação do ciclo de vida (LIMA et al., 2018).

Além disso, devido aos grandes volumes de FORSU gerados na cidade, esta fração consome uma parte significativa do tempo, do custo e dos investimentos relacionados à coleta, transporte e destinação adequada (KIM, 2019; MONTEIRO et al., 2001). Somado à grande quantidade de FORSU gerada nos domicílios, o município também conta com Estações de Tratamento de Esgoto que geram lodo, um resíduo orgânico oriundo dos serviços de saneamento. Só a ETE Monjolinho, a principal estação, gera mais de 4.150 toneladas de lodo de esgoto por ano e também utiliza a disposição em aterro sanitário, mas neste caso, o aterro fica em Guatapar, a 150 km da fonte (SÃO CARLOS, 2020).

Portanto, a prioridade para o tratamento de resíduos orgânicos se justifica do ponto de vista da escala dos benefícios obtidos a partir de tecnologias mais limpas. Em 2020, o Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS de São Carlos, elaborado tardiamente, depois de quase 10 anos da sua exigência legal (BRASIL, 2010), aponta a necessidade urgente de estudos nos próximos dois anos para apontar as alternativas mais adequadas para o tratamento da FORSU, com o objetivo de reduzir a disposio de resíduos em aterros sanitários (SÃO CARLOS, 2020).

Tendo em vista esse contexto, o presente estudo busca contribuir com melhoria contínua do sistema de gestão de resíduos sólidos no município de São Carlos, apresentando uma alternativa para a destinao ambientalmente adequada dos resíduos sólidos orgânicos que priorize a reciclagem e o tratamento dos resíduos frente  decisão precipitada de disposio final em aterros, de modo que os resíduos sejam utilizados como mteria-prima para a produo de fertilizantes orgânicos, incluindo não somente a frao orgânica dos resíduos sólidos urbanos como também o lodo de estao de tratamento de esgoto e os resíduos de poda e capina dos serviços de limpeza urbana.

## **2 OBJETIVOS**

O projeto de pesquisa tem como objetivo geral avaliar a viabilidade da produção de fertilizante orgânico por meio da compostagem do lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto doméstico e da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos no município de São Carlos. Para avaliar continuamente o andamento da pesquisa foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- I. Operar em laboratório sistema de leira de compostagem por revolvimento manual;
- II. Avaliar os parâmetros físico-químicos do processo e do fertilizante orgânico obtido ao final da compostagem;
- III. Elaborar uma proposta de usina de compostagem para o município de São Carlos.

### **3 REVISÃO DA LITERATURA**

#### **3.1 Processo de compostagem de resíduos**

A compostagem é uma técnica antiga, utilizada há milênios. Na Europa, havia um produto chamado “nitreira” que era obtido através da mistura de restos vegetais e animais (KIEHL, 1985, p. 229). Restos de animais e plantas eram tradicionalmente utilizados para recompor os níveis de matéria orgânica no solo e permitir a produtividade das culturas agrícolas até que foram substituídos rapidamente por fertilizantes químicos (SENESI, 1989), sobretudo pela baixa relação entre preço do fertilizante e preço do produto agrícola (SOARES; BARROS; CARMO, 1983). Atualmente, o uso de fertilizantes químicos, também chamados de minerais, são amplamente utilizados no Brasil, cuja importação chega a 70 % (COSTA et al., 2018).

A compostagem consiste em um processo biológico de transformação da matéria orgânica em um produto estável, similar ao processo que ocorre naturalmente no solo (DE BERTOLDI; VALLINI; PERA, 1983). É um processo predominantemente aeróbio, onde microrganismos utilizam o oxigênio do ar para converterem a matéria orgânica em gás carbônico (dióxido de carbono), vapor de água e matéria orgânica estabilizada (MASSUKADO, 2004).

De um ponto de vista técnico-normativo, a ABNT NBR 13591:1996 define compostagem como um processo em duas etapas, uma ativa e outra de maturação, onde populações diversificadas de organismos realizam, em condições controladas, a decomposição da fração orgânica biodegradável de resíduos (ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996).

Para (KIEHL, 1985), a compostagem é uma técnica que utiliza um processo biológico controlado de decomposição bioquímica de materiais orgânicos para obtenção de fertilizantes. Nesta última definição há uma ênfase na produção – o objetivo final é a obtenção de fertilizantes orgânicos de qualidade.

No uso como fertilizante no solo, o composto traz diversos benefícios que levam ao aumento da produtividade das culturas (ALVARENGA et al., 2015; FIALHO et al., 2011), tais como: aumento da capacidade de retenção de água; aumento da capacidade de troca de cátions, o que diminui a perda de nutrientes por lixiviação; melhora a aeração do solo pela formação de agregados de solo mais estáveis, o que também previne a erosão; aumento do

pH e da capacidade tampão; fornece no solo novas formas de matéria orgânica, macro e micro nutrientes para as plantas; aumenta também a biodiversidade das comunidades microbianas no solo.

A compostagem é também considerada como uma técnica de tratamento de resíduos sólidos e está, ao lado da digestão anaeróbia e da pirólise, entre as três tecnologias mais estudadas na literatura acadêmica para esse fim (LOHRI et al., 2017). Isoladamente, a compostagem possui a vantagem que está no fato de obter um material rico em nutrientes para recompor a qualidade do solo no cultivo de plantas (SCHALCH et al., 2019). Mas também pode ser combinada com outras tecnologias de tratamento de resíduos orgânicos, por exemplo, para a estabilização dos resíduos oriundos de reatores de digestão anaeróbia (ou de biometanização) (PACE et al., 2018).

Quando se utiliza o lodo de esgotos na compostagem, as duas perspectivas assumem o mesmo ângulo de visão – o lodo é tanto insumo (matéria prima) para a produção de fertilizante, quanto resíduos sólido a ser tratado e condicionado para sua disposição adequada no meio ambiente. Diversas pesquisas exploram os benefícios do lodo no melhoramento das propriedades do solo para a produção de alimentos. A compostagem é uma tecnologia bastante recomendada para a adequação do lodo e seu uso como fertilizante (LAURA et al., 2020). Mas, segundo (BETTIOL; CAMARGO, 2006) os solos onde são aplicados lodos de esgoto, com ou sem compostagem, precisam ser monitorados continuamente em relação a nitratos, metais, compostos orgânicos persistentes e microrganismos patogênicos, além das alterações físicas e biológicas que ocorrem no solo.

E sendo a compostagem um processo produtivo como qualquer outro, é necessário avaliar a qualidade da matéria prima, otimizar os parâmetros de processo para dar mais velocidade e produtividade, e depois a garantia de um fertilizante orgânico que atenda a necessidade de uso pretendido. Por isso o conhecimento sobre os parâmetros que regem a compostagem é crítico para o bom funcionamento do processo, para a garantia de qualidade do produto final e para a eficiência operacional das unidades de gerenciamento de resíduos sólidos. Mesmo sendo um processo bioquímico complexo que envolve muitos elementos diferentes, fluxos de matéria e energia, microrganismos diversos, etc., há parâmetros que podem ser utilizados para seu monitoramento, controle e avaliação como a relação C/N, a umidade, a temperatura e o pH (TUOMELA et al., 2000; VALENTE et al., 2008).

### 3.1.1 Parâmetros que regem o processo de compostagem

Fazendo um breve histórico, no início do século XIX, o que era feito na base do empirismo foi melhor desenvolvido com as pesquisas de Sir Albert Howard, que popularizou o método “Indore” e deu início a compreensão dos fatores que regem o processo (KIEHL, 1985, p. 229). Inicialmente os parâmetros estudados eram a temperatura, aeração, umidade e microrganismos. Depois é que foram constatadas a importância da relação entre carbono e nitrogênio (relação C/N), granulometria da matéria prima, pH e os nutrientes minerais (KIEHL, 1985).

Os microrganismos autóctones são os principais responsáveis pelo processo biológico de transformação da matéria orgânica na compostagem (BARREIRA; PHILIPPI; RODRIGUES, 2006; MASSUKADO, 2008; ZAHEDI, 2018). O conhecimento sobre a diversidade de populações e a dinâmica entre elas é fundamental para a concepção do processo de compostagem e a garantia da produção de um fertilizante orgânico de qualidade (ALFREIDER et al., 2002; HASSEN et al., 2001; VARGAS-GARCÍA et al., 2010). Com o início do processo de compostagem, o tempo determina uma sucessão ecológica entre bactérias, fungos e outros microrganismos conforme as mudanças de temperatura, umidade, concentração de oxigênio e disponibilidade dos compostos. Enquanto alguns grupos atuam permanentemente durante todo o processo, outros só ocorrem quando as condições ambientais e nutricionais são favoráveis (VARGAS-GARCÍA et al., 2010). Segundo (KIEHL, 1985), no início do processo, quando as temperaturas ainda são baixas, predominam fungos e bactérias produtores de ácidos. Mas que logo nos primeiros dias são dominadas pelas bactérias termofílicas devido à rápida elevação da temperatura. É nesse período que a matéria orgânica complexa, como carboidratos, proteínas e gorduras, são oxidados a substâncias mais simples. Inicia-se então uma nova fase mesófila com a queda da temperatura onde as bactérias mesófilas voltam a dominar. Com a nova condição, matéria orgânica de fácil assimilação e temperaturas amenas, ainda podem ser encontrados protozoários, vermes, formigas, e insetos diversos.

A umidade é outro parâmetro chave na regulação da compostagem. Os resíduos vegetais possuem de 60 a 90 % de água em sua composição, em função da espécie vegetal, da parte da planta e do grau de maturação (KIEHL, 1985, p. 14). Dependendo da composição dos resíduos levados ao tratamento, a umidade no início varia entre 40 e 60 %. O excesso de umidade pode levar a uma condição indesejável de anaerobiose. Por outro

lado, a falta de umidade pode retardar o processo uma vez que a água é essencial para os processos metabólicos dos microrganismos. Caso a pilha de compostagem esteja muito úmida, o simples revolvimento pode ser feito com maior frequência; e caso a umidade esteja baixa, é possível acrescentar água durante o revolvimento (KIEHL, 1985, p. 243; SOUZA et al., 2001, p. 7). A umidade é perdida durante o processo de decomposição, por isso é importante aplicar água durante o processo, mas sempre durante os revolvimentos, se não, é ineficiente, pois o líquido pode tomar caminhos preferenciais proporcionando uma má distribuição da umidade (KIEHL, 1985, p. 244). A insolação e o vento também podem agir para remover a umidade, portanto, cuidados devem ser tomados para não perder água de maneira excessiva em função do local onde o composto está exposto (KIEHL, 1985, p. 273).

Uma umidade de 50 % é o mínimo requerido para a compostagem de lodo de esgoto e a umidade é um fator preponderante sobre a temperatura (LIANG; DAS; MCCLENDON, 2003). Mas a composição dos resíduos e seu tipo também influenciam no patamar ótimo de umidade (BERNAL et al., 1998).

Na compostagem os microrganismos utilizam o oxigênio nos seus processos metabólicos. Assim, o conteúdo de oxigênio no ar, que é de aproximadamente 21 %, quando permeia a pilha, reduz-se até 2 % no seu interior (KIEHL, 1985). Desta forma, o revolvimento das pilhas de composto são um procedimento para restaurar os níveis de oxigênio, o que também pode ser feito com a insuflação de ar.

O consumo de oxigênio está relacionado com a temperatura, umidade, granulometria e a composição química dos materiais em decomposição (VALENTE et al., 2008). Em tese, os revolvimentos devem ocorrer para atender a concentração de oxigênio no interior da pilha. Mas como a medida de temperatura é mais fácil de obter que a concentração de oxigênio, a aeração normalmente é feita para manter uma determinada temperatura – evitar temperaturas acima de 65° C (ou ainda para atender uma umidade predeterminada, por exemplo no máximo 60 %) (KIEHL, 1985; MASSUKADO, 2008; VALENTE et al., 2008).

A reação química de quebra da molécula orgânica de glicose é um exemplo de reação química exotérmica que ocorre dentro dos microrganismos aeróbios. Isso explica por que as reações de decomposição da matéria orgânica na compostagem liberam calor. Pequenas quantidades de composto podem não mostrar esse aumento da temperatura porque o calor logo é dissipado no ambiente. Grandes quantidades de resíduos, porém, quando iniciam a compostagem logo apresentam um aumento da temperatura (KIEHL, 1985; VALENTE et al., 2008).

As altas temperaturas são desejáveis e cumprem o papel de destruírem sementes de ervas daninhas e reduzir a carga de organismos patogênicos. No entanto, temperaturas acima de 70°C e períodos muito longos nessas condições não são benéficos, uma vez que restringem o número de microrganismos que podem contribuir para a degradação da matéria orgânica. As leiras/pilhas apresentam um gradiente de temperatura, mais quente no interior e mais frio no exterior. É importante manter o revolvimento para que todo o material possa atingir temperaturas elevadas e garantir a efetiva estabilização da matéria orgânica e a redução dos microrganismos patogênicos em toda a massa (KIEHL, 1985; VALENTE et al., 2008). Além da temperatura, outros fatores estão relacionados com a eliminação de fungos, como o pH, umidade e a interação com outros microrganismos (HASSEN et al., 2001).

A partir da temperatura, o tempo de compostagem pode ser dividido em quatro fases: primeira fase mesófila, a temperatura se eleva até 40 a 45 C; segunda fase, termófila, a temperatura alcança 70 C ou mais, fase também chamada de bioestabilização; terceira fase, o retorno para a temperatura mesófila, a temperatura baixa em torno de 45 C, o que determina o fim da fase de bioestabilização anterior e o início da próxima fase de humificação; quarta fase, criófila, a massa adquire a temperatura ambiente, um sinal de que o composto está humificado. (KIEHL, 1985, p. 286)

No metabolismo dos microrganismos são necessários nutrientes como carbono e nitrogênio para viverem. Essencialmente o carbono é utilizado como fonte energética, e o nitrogênio é importante para a composição das proteínas e o material genético. A proporção entre as quantidades de carbono e nitrogênio a ser fornecido no início da compostagem gira em torno de 30 partes de carbono para 1 de nitrogênio, porque 10 partes constituirão a estrutura celular, e 20 será levado ao gás dióxido de carbono (VALENTE et al., 2008).

O desbalanço de carbono e nitrogênio pode levar a perda de nitrogênio através da volatilização da amônia e a produção de odores indesejáveis. Para reduzir a perda de nitrogênio, e conseqüentemente aumentar a qualidade nutricional do composto final, pode ser feita através da precipitação de estruvita (JEONG; KIM, 2001). A adição de material estruturante com carbono de rápida degradação, disponível logo no início da compostagem, é também uma estratégia para redução de perdas de nitrogênio (BERNAL; ALBURQUERQUE; MORAL, 2009).

### 3.2 Classificação do processo de compostagem

Os processos de compostagem podem ser classificados quanto à aeração, temperatura e tempo de compostagem (KIEHL, 1985, p. 232). Além disso, a compostagem pode ser empregada em modelos centralizados (que funcionam em larga escala, localizados fora do perímetro urbano e recebem resíduos de vários geradores) ou descentralizados (que incluem a compostagem domiciliar, comunitária e institucional) (DE SIQUEIRA; ASSAD, 2015). O modelo centralizado exige conhecimento técnico e controle operacional rigoroso para produzir um composto de qualidade que atenda aos requisitos mínimos sanitários (DE SIQUEIRA; ASSAD, 2015).

Segundo (FERNANDES; DA SILVA, 1999, p. 41), os processos de compostagem podem ser divididos em três grupos principais: sistemas de leiras revolvidas, também conhecido pelo termo em inglês *windrow*, onde os resíduos são dispostos em leiras e a aeração é proporcionada através do seu revolvimento periódico e da convecção ou difusão de ar na massa; sistema de leiras estáticas aeradas, onde os resíduos são dispostos sobre tubulação perfurada pela qual se injeta ou aspira o ar na massa e onde não há revolvimento; sistemas fechados ou reatores biológicos, também chamados pelo termo em inglês *in-vessel*, onde os resíduos são colocados em ambiente fechado e os parâmetros do processo como temperatura, concentração de oxigênio, umidade, etc. são controlados.

Dos três sistemas apresentados, o sistema *windrow* é o mais simples de todos. A mistura de resíduos é disposta em leiras de longos comprimentos de maneira que o revolvimento possa ser executado por um trator ou outro equipamento específico, como descrevem (FERNANDES; DA SILVA, 1999). Depois que a leira é montada a concentração de oxigênio no interior da massa de resíduos diminui conforme o processo biológico de degradação dos microrganismos. O revolvimento faz com que a massa de resíduos entre em contato com o ar atmosférico com maior concentração de oxigênio o que elava novamente a concentração do gás no interior. Este efeito é limitado e momentâneo, por isso a necessidade de revolvimento constante.

Figura 1 – Exemplo de sistema de leiras revolvidas na unidade de compostagem da empresa “Tera Ambiental” no município de Jundiáí, no Estado de São Paulo.



Fonte: (BELTRAME; BELTRAME; OLIVEIRA, 2019).

Como já mencionado anteriormente, são vários os fatores que influenciam no tempo de compostagem como relação C/N, teor de nitrogênio na matéria-prima, dimensões das partículas, aeração das pilhas, frequência dos revolvimentos, etc. Mas é importante mencionar que a escolha da máquina para revolvimento, se pá carregadeira ou outro tipo (revolvedor tracionado por trator), também influem no tempo de compostagem (KIEHL, 1985).

### **3.3 Composto orgânico, suas aplicações e requisitos de qualidade**

Uma das preocupações que giram em torno do processo de compostagem é a sua eficiência na produção de fertilizante. Busca-se uma tecnologia capaz de produzir composto estável, e no menor tempo possível. Segundo o professor da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, não é possível obter um composto bioestabilizado antes de 30 dias, ou mesmo 60 dias, ou um composto humificado antes de 90 dias, ou até mesmo 120 dias, dependendo do processo (KIEHL, 1985, p. 303). Um dos procedimentos, pois, utilizados para dar a “falsa ideia” de que o composto está curado consiste na desidratação do material (KIEHL, 1985, p. 305). O autor explica que a retirada

de água interrompe a decomposição e torna o material mais fácil para o manejo, armazenagem, embalagem e aplicação no solo. Uma vez reidratado, o processo de decomposição continua e o material pode aquecer, o que não ocorre com um fertilizante curado.

A aplicação do composto ainda não estabilizado (“imaturo”) no solo pode levar a altos níveis de concentração de gás carbônico e baixos níveis de oxigênio, impondo condições anaeróbias e redutoras que podem ser prejudiciais às plantas, além de promover a degradação da matéria orgânica que já estava no solo (FIALHO et al., 2011).

Outro tema que atrai discussões sobre os fertilizantes orgânicos é o fato de possuírem, geralmente, baixas concentrações de nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio (ou NPK, para abreviar), quando comparados com outros fertilizantes químicos. No entanto, por outro lado, apresentam quantidades de matéria orgânica e substâncias que permitem condicionar o solo. Os fertilizantes minerais apresentam as quantidades dosadas previamente para a cultura, quantidades essas de fácil assimilação pelas plantas. Por isso, os fertilizantes orgânicos não podem competir com os fertilizantes minerais pelas suas quantidades de NPK, de tal maneira que nunca poderiam substituí-los, mas seus valores estão nas outras frações e sua capacidade de condicionador no solo (KIEHL, 1985, p. 394).

Considerando a importância desses temas, o Estado brasileiro estabeleceu uma série regulamentos que disciplinam os produtos agrícolas derivados de resíduos sólidos e estabelece diretrizes para adequação ambiental dos estabelecimentos responsáveis pelo seu gerenciamento. Destaca-se no Quadro 1 a seguir as principais referências legais sobre o assunto.

Quadro 1 - As principais referências legais nacionais atualmente em vigor aplicáveis à reciclagem de resíduos orgânicos.

Norma	Disposição
Lei nº 6894/1980	Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências. (Redação dada pela Lei nº 12.890, de 2013).
Decreto nº 4.954/2004	Altera o Anexo ao Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que aprova o Regulamento da Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. (Redação dada pelo Decreto nº 8.384, de 2014)

(continua)

(continuação)

Norma	Disposição
Resolução CONAMA nº 375/2006	Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências.
Instrução Normativa SDA nº 27/2006	Dispõe sobre a importação ou comercialização, para a produção, de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes.
Instrução Normativa SDA nº 25/2009	Aprova as normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura.
Instrução Normativa GM nº 46/2011	Estabelece o Regulamento Técnico para os Sistemas Orgânicos de Produção Animal de Vegetal.
Instrução Normativa GM nº 53/2013	Estabelece disposições e critérios para a inspeção e fiscalização de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes e materiais secundários; o credenciamento de instituições privadas de pesquisa; e requisitos mínimos para avaliação da viabilidade e eficiência agrônoma e elaboração do relatório técnico-científico para fins de registro de fertilizante, corretivo e biofertilizante na condição de produto novo.
Instrução Normativa SDA nº 61/2020	Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura.

Fonte: autor.

Das normas apresentadas no quadro anterior, vale destacara algumas disposições da Resolução CONAMA 375/2006, que apresenta requisitos de qualidade e diretrizes para o uso da compostagem na produção de fertilizantes orgânicos.

A citada resolução lista os processos aceitos para redução significativa de patógenos e redução da atratividade de vetores. Segundo a norma, o processo de compostagem é considerado aceitável, desde que o processo de compostagem confinada ou em leiras aeradas apresente uma temperatura mínima de 55°C por 3 dias; ou com revolvimento das leiras, de 55°C por 15 dias; com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos 5 dias ao longo dos 15 dias do processo.

Além disso, vale ressaltar que essa Resolução veta a utilização agrícola de:

- ✓ lodo de estação de tratamento de efluentes de instalações hospitalares;
- ✓ lodo de estação de tratamento de efluentes de portos e aeroportos;
- ✓ resíduos de gradeamento;

- ✓ resíduos de desarenador;
- ✓ material lipídico sobrenadante de decantadores primários, das caixas de gordura e dos reatores anaeróbicos;
- ✓ lodos provenientes de sistema de tratamento individual, coletados por veículos, antes de seu tratamento por uma estação de tratamento de esgoto;
- ✓ lodo de esgoto não estabilizado; e
- ✓ lodos classificados como perigosos de acordo com as normas brasileiras vigentes.

A Tabela 1 apresenta um compilado dos parâmetros de caracterização e valores máximos permitidos para determinados parâmetros químicos, sobretudo metais, e também os microbiológicos.

Tabela 1 – Parâmetros para caracterização de lodo de esgoto e produtos derivados de acordo com a Resolução CONAMA 375/2006.

Caracterização	Parâmetros	Valor máximo permitido
Potencial agronômico	Carbono orgânico, fósforo total, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato/nitrito, pH em água (1:10), potássio total, sódio total, enxofre total, cálcio total, magnésio total, umidade, e sólidos voláteis e totais.	N/A
Química*	Arsênio	41
	Bário	1300
	Cádmio	39
	Chumbo	300
	Cobre	1500
	Cromo	1000
	Mercúrio	17
	Molibdênio	50
	Níquel	420
	Selênio	100
Patogênicos e indicadores bacteriológicos	Zinco	2800
	Coliformes Termotolerantes	<103 NMP / g de ST
	Ovos viáveis de helmintos	< 0,25 ovo / g de ST
	Salmonella	ausência em 10 g de ST
	Vírus	< 0,25 UFP ou UFF / g de ST

**Nota:** \* Valores em mg/kg, base seca. ST: Sólidos Totais NMP: Número Mais Provável UFF: Unidade Formadora de Foco UFP: Unidade Formadora de Placa. **Fonte:** adaptado da Resolução CONAMA 375/2006.

Ainda segundo a Resolução CONAMA 375, para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado será considerado estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,70.

Segundo a Resolução CONAMA 481/2017, que estabelece critérios e procedimentos (BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2020) para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, incluindo ou não a adição de lodo, dispõem em seu art. 6º que a relação C/N ao final do processo dever ser igual ou menor que 20:1.

Da mesma maneira, a IN SDA nº 61/2020, do MAPA, em seu art. 8º, inciso II, também prescreve o mesmo limite para a relação C/N no final do processo (BRASIL, 2020). Mas essa norma apresenta ainda especificações para os teores mínimos de nitrogênio e carbono para os diferentes tipos de fertilizantes orgânicos, de acordo com a matéria-prima utilizada na sua produção. Além disso, há especificações para a porcentagem máxima de umidade, que deve ser de no máximo 50 %, O teor mínimo de nitrogênio para fertilizantes orgânicos misto e composto deve ser de 0,5 % e o de carbono, 15 %, independente da matéria-prima utilizada.

### **3.4 Gestão de resíduos sólidos em São Carlos**

O município escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa foi São Carlos, na região central do estado de São Paulo. Possui uma área territorial de aproximadamente 1.136 km<sup>2</sup>, população estimada para 2021 em mais de 244 mil habitantes, com um grau de urbanização de 96 % (FUNDAÇÃO SEADE, 2021).

No ano de 2018, o município de São Carlos gerou, aproximadamente, 67.872 toneladas de RSU o que corresponde a uma média de 186 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia, ou 0,78 kg por habitante por dia (SÃO CARLOS, 2020). Os serviços de coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos, bem como sua disposição em aterro sanitário, desde 2010, é realizada pela São Carlos Ambiental, empresa privada do Grupo Solví, que assinou com o poder público municipal um contrato de parceria público-privada (PPP). Toda a massa de resíduos é disposta sem distinção no aterro sanitário que fica localizado dentro dos limites do município, com acesso pela rodovia Luís Augusto de Oliveira (SP-215) sentido Ribeirão Bonito. Ou seja, a fração passiva de reciclagem, que inclui a fração orgânica, é disposta junto com os rejeitos. Em estudo de composição gravimétrica dos RSU

realizado em 2018, estima-se que a fração orgânica no município seja de 37,5 % (KIM, 2019).

A cidade apresenta um histórico repleto de iniciativas que tentaram promover e ampliar a coleta seletiva e o aproveitamento de materiais passíveis de reciclagem, incluindo os resíduos orgânicos, contudo o nível de recuperação dos materiais é baixo. Por exemplo, a COOPERVIDA – Cooperativa de Trabalho de Catadores de Materiais Recicláveis de São Carlos, que é a maior organização formal de catadores do município com contrato de prestação de serviço com a prefeitura, foi capaz de comercializar apenas 600 toneladas de resíduos recicláveis em 2018, o que representa menos de 1 % de todos os resíduos dispostos no aterro sanitário no mesmo ano (SÃO CARLOS, 2020).

Segundo dados do PMGIRS de São Carlos os resíduos oriundos da poda eram triturados e posteriormente passavam por tratamento da compostagem na horta municipal. Os produtos da compostagem eram utilizados na forração do solo para novos plantio ou restauração de plantios em espaços públicos da cidade. Até a publicação do diagnóstico do PMGIRS, a prática tinha sido interrompida e não havia previsão para retorno (SÃO CARLOS, 2020). Seguindo o modelo descentralizado, o município é berço do Projeto GIRO, um projeto de educação ambiental da Associação Veracidade voltado para todas as faixas etárias, que realiza a separação e destinação de resíduos orgânicos para compostagem em diferentes pontos da cidade (SÃO CARLOS, 2020). Vale mencionar ainda a empresa “Semeia”, que oferece o serviço de coleta e tratamento por meio de compostagem dos resíduos sólidos orgânicos gerados em domicílios e pequenos estabelecimentos comerciais (SEMEIA COMPOSTAGEM, [s.d.]).

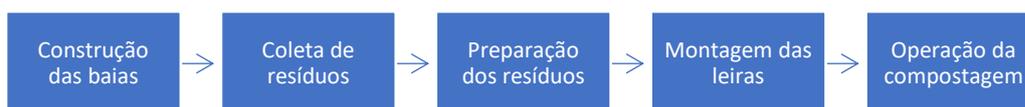
## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo consiste em uma pesquisa aplicada para avaliar a compostagem no tratamento de resíduos sólidos gerados no município de São Carlos. Dividida em duas etapas, uma experimental, que consistiu em testar a compostagem desses resíduos, e outra teórica, com o intuito de formular uma proposta viável de usina de compostagem. Esta seção é subdividida em três partes, onde as duas primeiras descrevem o teste de compostagem e os parâmetros utilizados em laboratório para monitoramento e análise do fertilizante; e a terceira e última parte, indica o procedimento adotado para a elaboração da referida proposta.

### 4.1 Descrição do processo de compostagem

Nesta primeira etapa da pesquisa, realizada em laboratório, seguiu-se o seguinte fluxograma de trabalho (Figura 2). Primeiro foi construído um sistema de “bacias” para conter as leiras de compostagem; depois os resíduos de interesse foram coletados; esses resíduos passaram por um processo de preparação com trituração e separação de materiais indesejáveis; por penúltimo, as leiras foram montadas e por último, a etapa mais longa, foi da operação da compostagem por 120 dias.

Figura 2 – Fluxograma de trabalho na etapa de experimentação com a compostagem.



Fonte: autor.

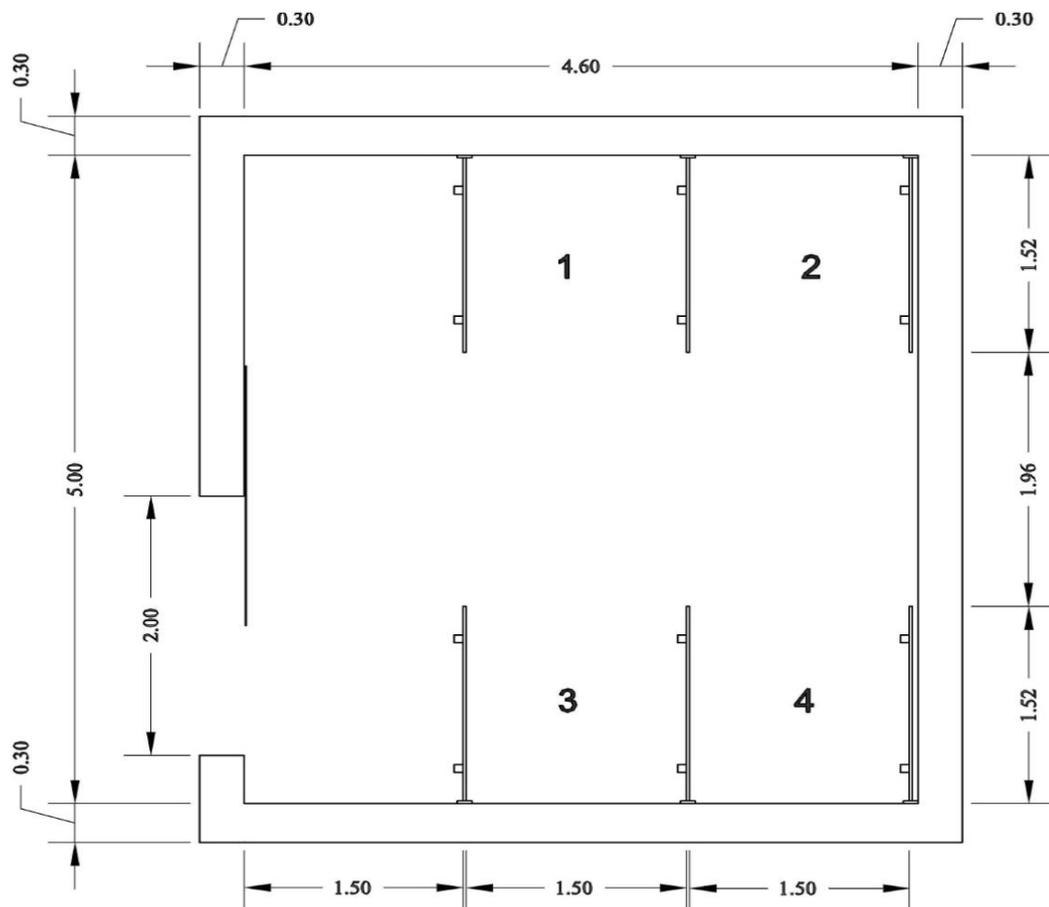
Cada uma das etapas é detalhada nas subseções apresentadas a seguir.

#### 4.1.1 Construção das baias de compostagem

Visando o melhor aproveitamento da área disponível para realizar o experimento foram construídas quatro baias de madeira, visando a contenção dos resíduos e obtenção de alturas maiores (Figura 3). A área era coberta, uma sala com portão de ferro com passagem de 2 metros, com uma área total de cerca de 23 m<sup>2</sup>. Foram utilizados tábuas e caibros de pinus natural, sem tratamento, fixados com parafusos. Cada baia foi construída com 1,5

metros de largura, comprimento e altura (formando um cubo). A construção das baias, mostrada na Figura 4, levou cerca de três dias para ficar pronta.

Figura 3 – Desenho no AutoCAD das baias de compostagem.



Nota: Números de 1 a 4 indicam a posição das baias compostagem. Fonte: autor.

Figura 4 – Construção das baias de compostagem.



Nota: foto do espaço de trabalho para corte das tábuas (esquerda); foto das tábuas cortadas (direita). Fonte: autor.

Com esse sistema de quatro baias foi possível montar três leiras com composições diferentes e manter uma baia sempre vazia, que é útil para realizar o procedimento de revolvimento, como é descrito em detalhes nas seções seguintes.

#### 4.1.2 Coleta de resíduos

Os resíduos utilizados na compostagem foram obtidos de quatro fontes distintas localizados no município de São Carlos. O lodo de esgoto foi obtido na Estação de Tratamento de Esgoto – ETE Monjolinho, a principal unidade de tratamento de esgoto do município. Já os resíduos de restos de alimentos, representantes da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, foram obtidos em dois estabelecimentos comerciais, que geram quantidades maiores, um restaurante de uma fábrica e um supermercado. Os resíduos de poda, utilizados com a função estruturante, foram obtidos no próprio campus da USP (área 1). Em relação ao transporte, foi disponibilizado pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) um veículo tipo “picape” para o transportar os resíduos dos estabelecimentos até o laboratório, com exceção dos resíduos de poda que ficaram sob responsabilidade da própria equipe de limpeza do campus.

Os resíduos de poda foram acumulados pela equipe de limpeza e manutenção de áreas verdes entre os dias 22 e 30 de outubro de 2020. O material ficou armazenado em área aberta, exposto ao sol e à chuva, até o dia da montagem. Uma parte foi armazenada em cobertura, que foi utilizada para caracterização.

Figura 5 – Armazenagem externa de resíduos de poda e limpeza de áreas verdes do campus.



Fonte: autor.

Figura 6 – Armazenagem interna de resíduos de poda e limpeza de áreas verdes da universidade.



Fonte: autor.

A coleta no supermercado foi realizada em três dias distintos, entre os dias 11 e 17 de novembro de 2020. Para a coleta desses resíduos no supermercado, era necessário esperar os empregados do estabelecimento fazerem a seleção dos alimentos que seriam descartados no dia. Os alimentos considerados como resíduos são identificados e pesados para controle interno do supermercado, para só depois serem dispostos para a destinação final. Dentre os diferentes produtos descartados, foram encontrados batata, laranja, limão, alface, melancia, abacaxi, milho, abóbora, beterraba, maçã, morango, coco, cebola, tomate, caqui, dentre outros (Figura 7). Para acondicionar os resíduos durante o transporte até o laboratório, foram utilizados sacos plásticos de 50 litros e caixas plásticas grandes de 186 litros.

A primeira coleta no restaurante da fábrica foi no dia 12 de novembro de 2020. Na empresa, os resíduos são armazenados temporariamente em sacos plásticos dispostos em uma sala refrigerada. Neste caso, os sacos foram coletados como estavam e levados até o laboratório para armazenagem até a compostagem (Figura 8). Uma segunda coleta também foi feita na fábrica, no dia 16 de novembro de 2020. Foram encontrados alimentos cozidos como arroz, feijão, macarrão, bifés de carne bovina e de frango, tortas de frango, beringela e abobrinha, ovos fritos, legumes diversos, pães, queijo e presunto, pó de café, restos de chá.

Figura 7 – Armazenagem nas baias de compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos coletada no supermercado.



Fonte: autor.

Figura 8 – Armazenagem nas baias de compostagem dos resíduos do restaurante da fábrica.



Fonte: autor.

As coletas de lodo na ETE Monjolinho foram realizadas nos dias 11 e 12 de novembro de 2020. O lodo era espessado (desaguado) com o uso de uma centrífuga, que possui na saída uma rosca sem fim que empurra o material até às caçambas de transporte (Figura 9). Para coletar as amostras, a rosca foi direcionada para dispor uma parte do lodo diretamente no chão, ao lado das caçambas, e encher os recipientes de coleta com as pás (Figura 10). Foram utilizados dois tipos de recipientes para a coleta de lodo, bombonas de leite com capacidade para um pouco mais de 50 litros e caixas plásticas com capacidade de 186 litros.

Figura 9 – Vista de cima da rosca sem fim transportando lodo de esgoto na ETE Monjolinho.



Fonte: autor.

Figura 10 – Procedimento de coleta de lodo na ETE Monjolinho.



Fonte: autor.

Figura 11 - Armazenagem do lodo.



Fonte: autor.

Os resíduos de restos de alimentos ficaram armazenados nas baias até o dia de trituração e montagem das leiras.

#### **4.1.3 Preparação dos resíduos**

A trituração dos resíduos foi feita no dia 17 de novembro de 2020 utilizando um triturador com potência de 1,5 cavalos (cv), da marca “Trapp”, modelo TR 200, que utiliza um sistema de facas (Figura 12). Impurezas, como sacos plásticos, ou qualquer objeto estranho, foram retirados para descarte. Galhos de pequenas dimensões e espessura, folhas e restos de alimentos pequenos e muito úmidos – tais como arroz, feijão e macarrão – foram dispensados do processo de trituração. Apenas galhos maiores, frutas e legumes inteiros (ou em pedaços grandes) como batatas, melancias, e abóboras, por exemplo, foram triturados.

Figura 12 - Triturador Trapp modelo TR200 com 1,5 cv de potência.



Fonte: autor.

Depois de trituração, os resíduos ficaram separados por tipo, cada um disposto em uma baía separadamente, até o momento da montagem das leiras, conforme apresentado na Figura 13. Devido a sua umidade e características, uma parte dos resíduos de restos de alimentos (triturados) ficaram acondicionados em tambores de plástico, já que não seria possível mantê-los contidos em uma única baía (Figura 14).

Figura 13 – Armazenagem de resíduos triturados pré-montagem das leiras.



Fonte: autor.

Figura 14 – Acondicionamento de resíduos de restos de alimentos (triturados).



Nota: parte dos restos de alimentos triturados ficou acondicionada em baldes plásticos ao lado da baia.

Após a trituração dos resíduos, foram coletadas amostras de cada um dos resíduos para caracterização. A coleta obedeceu aos requisitos de amostragem da ABNT NBR 10007:2004 (ABNT, 2004).

#### 4.1.4 Montagem das leiras de compostagem

As leiras de compostagem foram montadas em camadas dentro das baias, seguindo uma ordem predeterminada, conforme ilustrado na Figura 15. A primeira e a última camada são feitas com o resíduo estruturante. Entre essas camadas são intercaladas camadas do resíduo orgânico a ser compostado e camadas de resíduo estruturante, até obter uma altura ou quantidade, em massa ou volume, planejada.

Esse procedimento foi realizado com o auxílio de uma ficha de montagem. As camadas foram preenchidas aos poucos, anotando-se na ficha a massa de cada porção de resíduo adicionada à leira (Figura 16). A medição da massa foi realizada com uma balança, usando uma caixa plástica de 186 litros, conforme a Figura 17

Figura 15 – Sequência de montagem das leiras de compostagem.



**Nota:** os números indicados não representam, necessariamente, o número exato de camadas que constituem a leira; o número 1 indica a primeira camada, seguida de uma camada de resíduo orgânico (número 2), depois uma camada de poda (número 3) e assim por diante, até o número 8, que indica a última camada.

**Fonte:** elaborado pelo autor.

Figura 16 – Execução da montagem da leira de compostagem.



**Nota:** preenchimento da primeira camada de resíduo estruturante no fundo (esquerda); espalhamento e acomodação da camada (direita). Fonte: autor.

Figura 17 – Pesagem das porções de resíduos adicionadas às camadas de montagem das leiras.



Nota: caixa plástica com resíduo de poda sobre a balança (esquerda); balança vazia (direita). Fonte: autor.

Encerrada a montagem, a composição das leiras ficou como apresentado na Tabela 2, de modo que a leira 1 recebeu tanto o lodo quanto o resíduo de restos de alimento, na mesma proporção; a leira 2, apenas lodo; e a leira 3, apenas restos de alimento. Para facilitar a leitura, no decorrer do texto, as leiras são denotadas, respectivamente, como L1, L2 e L3.

Tabela 2 – Composição das leiras de compostagem.

Resíduo/Água	L1	L2	L3	Subtotal
Lodo	266,9 (36,1 %)	514,1 (65,7 %)	0,0 (0 %)	781,0
Restos de alimento	261,1 (35,3 %)	0,0 (0 %)	475,1 (72,6 %)	736,3
Poda e capina	139,4 (18,9 %)	158,4 (20,2 %)	129,7 (19,8 %)	427,4
Água	71,5 (9,7 %)	110,0 (14,1 %)	50,0 (7,6 %)	231,5
Total	739,0 (100 %)	782,5 (100 %)	654,8 (100 %)	2.176,2

Nota: valores em quilograma e porcentagem apresentada entre parênteses. Fonte: autor.

Tomando as dimensões das baias como referência, cada leira ficou com uma altura de 1,20 metros, largura de 1,5 metro e profundidade de 1,5 metros, o que representa um volume aproximado de 1,35 m<sup>3</sup>. Para atingir essas dimensões, foram necessárias de duas a três pessoas<sup>1</sup> trabalhando em dois dias para montar as três leiras.

A quantidade de cada resíduo a ser adicionado foi previamente planejada visando atingir uma umidade inicial mínima de 55 % e relação C/N acima de 20.

<sup>1</sup> Foram três pessoas no primeiro dia e duas pessoas no segundo dia.

#### 4.1.5 Operação da compostagem

Depois de montadas, as leiras foram monitoradas em termos de umidade e temperatura, e eram realizados revolvimentos periodicamente, com uma frequência maior no início do processo, diminuindo progressivamente ao longo das fases de compostagem. Nos primeiros 30 dias, a frequência era de 3 a 4 revolvimentos por semana; depois, 2 a 3 revolvimentos até completar 45 dias; depois, apenas 1 revolvimento por semana até completar 90 dias; com um último revolvimento realizado com 30 dias antes de completar os 120 dias de compostagem.

O procedimento de revolvimento consistia basicamente em transferir uma leira de uma baia para outra (das quatro baias, uma sempre permanecia vazia), começando pela parte superior da leira e terminando pela parte inferior. Deste modo, a porção que estava em cima, exposta a maior incidência de luz e maiores concentrações de oxigênio, passava para o fundo da baia vazia, com maior umidade, menor incidência de luz e menores concentrações de oxigênio.

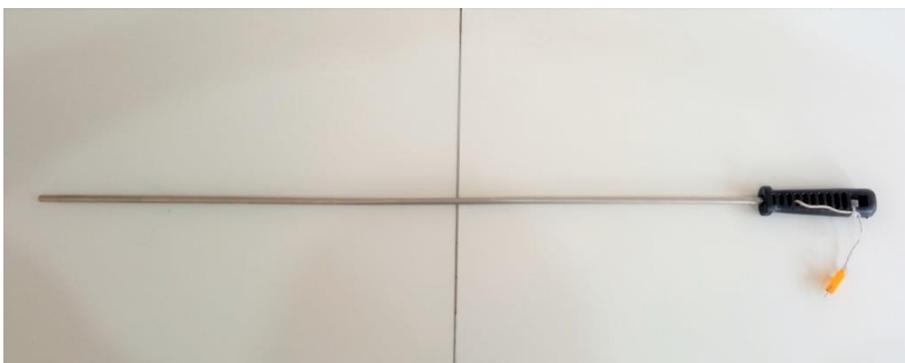
Figura 18 - Execução do procedimento de revolvimento.



Nota: seta indica sentido do revolvimento. Na foto, a compostagem está com 54 dias de operação. Fonte: autor.

A temperatura era aferida diariamente com termômetro digital da marca Minipa, modelo MT-405, que utiliza sensores termopar do tipo “K” fixados em uma haste de metal oca (o fio do sensor ficava no interior, tocando a ponta da haste), conforme mostrado na Figura 19. A haste tinha cerca de 70 centímetros, o que permitia tomar temperaturas a uma altura de até 30 centímetros do piso, quando inserida na pilha com altura de até 1,0 metro. A temperatura ambiente era medida com o mesmo termômetro digital, com um sensor exposto diretamente ao ar, sem o uso da haste de metal.

Figura 19 - Sensor termopar acoplado a haste de metal para aferição de temperatura.



Nota: A linha no meio não faz parte da haste, mas sim da mesa sobre a qual foi tirada a foto. fonte: autor.

A temperatura era tomada utilizando as hastes sempre na mesma posição em três pontos distintos (no centro da leira, em uma linha horizontal, equidistantes umas das outras), conforme apresentado na foto da Figura 20. A haste era feita de alumínio e esquentava junto com a pilha de resíduos. Se fosse necessário utilizar a mesma haste para medir duas leiras, esperava-se alguns minutos até a temperatura entrar em equilíbrio. A medição da temperatura era feita preferencialmente no fim da tarde, por volta das 17 horas, anotando-se os valores diariamente em uma ficha de monitoramento de temperatura.

Figura 20 – Posicionamento dos sensores de temperatura na leira.



Fonte: autor.

#### **4.2 Análise dos parâmetros físico-químicos**

Foram realizadas análises de parâmetros físico-químicos do processo de compostagem em três momentos distintos: antes da compostagem, para a caracterização dos resíduos; durante a operação da compostagem, para monitoramento e avaliação do processo; e no final da compostagem, para avaliação do composto final. O Quadro 2 apresenta o resumo dos parâmetros utilizados apontando os principais métodos e a frequência de coleta.

Quadro 2 – Parâmetros físico-químicos utilizados no experimento laboratorial.

Parâmetros	Frequência	Tipo de amostra	Método
Temperatura	Diária	-	Termômetro Digital MT-405 com sonda termopar tipo k.
Umidade	Semanal ou mensal (1)	Seca	Secagem a peso constante a 65C
Densidade	Na caracterização dos resíduos, composto inicial e final	-	Pesagem em recipiente com volume conhecido.
pH	Na caracterização dos resíduos	in natura	pH da amostra "in natura" em água destilada
Matéria orgânica	Na caracterização dos resíduos	Seca	Diferença de massa após calcinação
CRA	Composto final	in natura	Teste com papel filtro
Carbono orgânico total (1)	Composto final	Seca, moída e peneirada	Análise Elementar
Nitrogênio total	Composto final	Seca, moída e peneirada	Análise Elementar

Nota: (1) Semanal na fase termofílica e mensal na fase mesofílica. CRA – capacidade de retenção de água.  
Fonte: autor.

Após a apresentação do quadro resumo, são apresentados a seguir os procedimentos com todo o detalhamento pertinente.

#### 4.2.1 Coleta e preparação de amostras

A amostragem, incluindo coleta, transporte, armazenagem e preservação de amostras, observou os requisitos e recomendações da ABNT NBR 10007:2004 (ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). Amostras representativas de composto foram coletadas com massa entre 0,8 kg e 1,0 kg de cinco pontos diferentes da leira, em diferentes estágios da compostagem nas frequências determinadas conforme o Quadro 2. As amostras eram preservadas em geladeira por volta de 2 °C, até a secagem por meio de estufa com circulação de ar regulada para 65 °C com tempo de secagem mínimo de 48h. Durante a secagem, com 24h as amostras eram reviradas para evitar umidade remanescente no fundo. As amostras secas eram trituradas e peneiradas

com abertura<sup>2</sup> de 2 milímetros para então serem enviadas porções com no mínimo 100 gramas para as análises químicas (BRASIL, 2017).

#### 4.2.2 pH

Para medição de pH dos resíduos, foi utilizado o método descrito no manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos, do MAPA, adaptado da seguinte maneira: a suspensão foi feita em água destilada, por simplificação, dispensando-se o uso da solução de cloreto de cálcio (BRASIL, 2017). Basicamente, o método consiste, portanto, em suspender a amostra em água destilada e proceder à medida potenciométrica do pH. O procedimento é, em síntese, conforme descrito:

- ✓ Pesar 10 g ( $\pm 1$  mg) da parte da amostra “in natura” reservada para tal, transferir para béquer de 100 mL, adicionar 50 mL de água destilada, homogeneizar e aguardar 30 minutos, agitando de 10 em 10 minutos.
- ✓ Ligar o potenciômetro 30 minutos antes do uso e calibrá-lo com as soluções-tampão de pH 7 e 4. Trabalhos em série requerem a lavagem do eletrodo entre uma leitura e outra, com água, e secagem com papel-toalha ou similar.
- ✓ Medir o pH da solução ou suspensão da amostra pela inserção cuidadosa do eletrodo de forma que este se mantenha no nível da solução, sem entrar em contato com algum material decantado da amostra.
- ✓ Registrar a leitura.

As amostras utilizadas para medição de pH estavam “in natura”, sem prévia secagem, trituração ou peneiramento.

---

<sup>2</sup> A abertura da peneira recomendada pelo “manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos”, do MAPA (2017), é de 500 micrômetros, contudo, foi utilizada abertura de 2 milímetros porque, além de ser a peneira disponível em laboratório, o analisador elementar tolerava granulometrias mais grosseiras.

### 4.2.3 Umidade

A umidade era obtida por meio de secagem por meio de estufa com circulação de ar regulada para 65 °C com tempo de secagem mínimo de 48h. Durante a secagem, com 24h as amostras eram reviradas para evitar umidade remanescente no fundo. (BRASIL, 2017). A umidade é dada, em porcentagem, pela diferença de massa antes e após a estufa.

Como os resultados de umidade podem demorar dois dias, e há a necessidade de identificar excesso ou escassez de umidade durante o processo, foi adotado procedimento qualitativo para monitorar a umidade no dia a dia da operação. O método adotado foi o teste rápido conforme orienta (KIEHL, 1985, p. 287), utilizando as mãos.

### 4.2.4 Matéria orgânica (Sólidos Voláteis)

Para a determinação e matéria orgânica, pesou-se cerca de 30g das amostras secas, conforme descrito na seção anterior, submetendo-as a calcinação por 550°C durante um período de 4 horas. A diferença percentual entre os sólidos totais e o resíduo remanescente após calcinação é considerada como o percentual de matéria orgânica (BRASIL, 2017).

### 4.2.5 Carbono e nitrogênio

As determinações de carbono e nitrogênio foram realizadas com a combustão a seco em um analisador elementar da marca *ThermoScientific*, modelo *FlashSmart*, disponível na Central de Análises Químicas Instrumentais – CAQI, do Instituto de Química de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

### 4.2.6 Capacidade de retenção de água (CRA)

A capacidade de retenção de água (CRA) foi determinada conforme a metodologia proposta por Monteiro e Frighetto (2000). O procedimento consiste nos seguintes passos:

- ✓ Pesar cerca de 20 g do composto e de 100 g de água destilada em balança analítica;

- ✓ Colocar o composto em um funil com papel filtro montado sobre um erlenmeyer, cujo peso inicial também foi determinado;
- ✓ Adicionar aos poucos a água destilada sobre o composto contido no papel de filtro.
- ✓ Deixar repousar por uma noite, sendo os frascos cobertos com papel alumínio para evitar a evaporação;
- ✓ Pesar o erlenmeyer com a água percolada, que passou pelo material.
- ✓ Calcular a CRA.

As testemunhas (ou “branco”), também em duplicata, seguem o mesmo procedimento. O cálculo da CRA é dado pela seguinte fórmula (MONTEIRO; FRIGHETTO, 2000):

$$CRA = \left[ \frac{(W_a + W_u) - (W_p + W_b)}{C_s} \right] \times 100$$

Onde,

$W_a$ : água destilada adicionada no funil;

$W_u$ : água da umidade natural do composto;

$W_p$ : água percolada para o erlenmeyer;

$W_b$ : água retida no “branco”;

$C_s$ : massa seca do composto (sem umidade).

A Figura 21 apresenta o aparato montado para a determinação da CRA. Como se pode observar na figura, na falta de papel alumínio, foi utilizado plástico filme.

Figura 21 – Aparato para determinação da capacidade de retenção de água – CRA.



Fonte: autor.

#### 4.2.7 Densidade aparente

A densidade aparente foi determinada através do método do cilindro volumétrico (DONAGEMA et al., 2011, p. 66). O procedimento na determinação da massa do resíduo em um recipiente cilíndrico de volume e massa conhecidos, conforme apresentado na Figura 22. A densidade será igual à massa indicada na balança, fazendo o devido desconto da massa do próprio balde, dividido pelo volume do balde.

Figura 22 – Determinação da densidade aparente pelo método do balde.



Nota: restos de alimento do supermercado (esquerda) e do restaurante (direita). Fonte: autor.

A determinação da densidade foi feita tanto para os resíduos de entrada quanto para as leiras no início do processo e no final, para o composto pronto. No caso do resíduo

estruturante, adaptou-se o método com a substituição do balde pela caixa plástica que apresenta um volume maior.

### **4.3 Elaboração de uma proposta de usina de compostagem**

A proposta de usina de compostagem para o município de São Carlos foi elaborada com base nos resultados obtidos em laboratório e dados da literatura, quando necessária a complementação. Foram levados em consideração os objetivos e metas do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de São Carlos em um horizonte de 20 anos de planejamento. A proposta é constituída de uma projeção da geração de resíduos ao longo do período, um dimensionamento da área necessária para o processamento adequado de todos os resíduos e a indicação de equipamentos que devem ser utilizados.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Esta seção foi dividida em duas partes. A primeira parte apresenta os resultados experimentais da compostagem. A segunda parte apresenta a construção dos cenários possíveis para a implantação da compostagem no município, com base nos resultados obtidos em laboratório e dados da literatura, quando necessária a complementação.

### **5.1 Resultados experimentais**

#### **5.1.1 Considerações sobre os métodos de coleta e preparação dos resíduos**

Primeiramente, é importante fazer algumas considerações a respeito dos métodos utilizados na coleta e preparação de resíduos. No primeiro dia de coleta nos estabelecimentos que participaram da pesquisa, os sacos plásticos de 50 litros (popularmente conhecidos como “sacos de lixo”) não demonstraram ser resistentes o suficiente. Apesar do cuidado no manuseio, ocorreu que alguns sacos acabaram rasgando e derrubando resíduos no chão. Já no segundo dia, foram usadas caixas plásticas, que se mostraram ser mais práticas e evitaram o problema dos sacos, por isso foram adotadas como procedimento padrão nas coletas posteriores.

Outro recipiente que apresentou problemas na utilização foram as bombonas de leite (Figura 23). Na prática, por possuírem um diâmetro de abertura menor que a própria pá, sua utilização levou a dificuldades inesperadas. Parte do lodo acabava caindo para fora do recipiente o que exigia mais tempo para encher e limpar as laterais antes do transporte. Além disso a maior dificuldade de utilizar essas bombonas está no momento do esvaziamento. Como a abertura da bombona é pequena e o lodo é bastante denso e viscoso, o lodo ficava aderido nas paredes e exigia bastante esforço para ser removido. Era necessário utilizar as mãos (com luvas de proteção) para “raspar o fundo”. Por outro lado, as caixas plásticas não apresentaram esse problema, porque possuem uma abertura grande e geometria de fácil de manuseio. Tendo em vista essa experiência, recomenda-se o uso das caixas plásticas maiores. Porém, deve-se respeitar um limite de enchimento até no máximo  $2/3$  do volume total, o que permite que a caixa seja levantada por duas pessoas sem muito esforço.

Figura 23 – Detalhe do uso das bombonas de leite na coleta de lodo na ETE.



Fonte: autor.

Sobre a preparação dos resíduos para compostagem, destaca-se a seguinte questão sobre a etapa de trituração. Observou-se que o triturador, que utiliza um sistema de facas, apresentava rendimento muito baixo para a trituração de folhas e galhos, de tal maneira que seria necessário vários dias de trabalho para processar todo o material de folhas, galhos e restos de alimentos (o lodo não necessita de trituração). Além disso, no caso das folhas e galhos, não houve redução significativa de tamanho das partículas, como pode ser observado na Figura 24. Nota-se que, mesmo depois de passar pelo equipamento, a maior parte das folhas passava pelas facas e permaneciam praticamente com o mesmo tamanho. Apenas galhos e folhas mais compridos eram afetados.

Figura 24 – Resíduos de poda e capina antes e depois do processo de trituração.



Nota: Antes (esquerda) e depois (direita) da trituração. Fonte: autor.

Por outro lado, o desempenho com frutas e legumes foi bastante satisfatório. Porém o processo é demorado porque necessita de atenção de quem está operando o equipamento para não ocorrer o travamento das facas - sobretudo quando se tentava processar restos de alimentos cozidos ou com muita umidade (arroz, feijão, macarrão, etc.), formando uma massa densa que impede o giro das facas.

### 5.1.2 Caracterização dos resíduos

A caracterização dos resíduos em termos de umidade, sólidos totais voláteis (STV) e pH é apresentada na Tabela 3. Como já era esperado, os resíduos de lodo e alimento apresentaram alta presença de umidade, maiores que 70 %, enquanto que os resíduos de poda e capina apresentaram baixa umidade, menor que 20 %.

O pH para os resíduos de alimento apresentou um valor de 3,52 evidenciando uma acidez relativamente alta desse material. O que pode ter ocorrido pela presença de laranja, limão e outras frutas cítricas que estavam presentes. Os resíduos de lodo e poda apresentaram um pH levemente ácido, pouco abaixo de 7,0.

Quanto aos sólidos totais voláteis, o alimento apresentou uma fração elevada, acima de 90 % de sólidos voláteis. A poda também apresentou valor alto, mas um pouco menor, em torno de 80 %. O lodo apresentou um valor e 55 % de sólidos voláteis, o que pode ser atribuído ao fato do sistema de tratamento de esgoto utilizar no seu tratamento secundário o reator UASB, que produz um lodo já estabilizado (PENETRA et al., 1999).

Tabela 3 – Caracterização dos resíduos de partida (matéria prima).

Resíduo	Umidade	STV	pH
Alimento	75,03 %	91,05 %	3,52
Lodo	78,91 %	55,37 %	6,60
Poda	20,64 %	80,65 %	6,70

Nota: STV – sólidos totais voláteis. Fonte: autor.

Os resultados para densidade aparente dos resíduos e o cálculo do volume ocupado por uma tonelada desse mesmo resíduo são apresentados na Tabela 4. Dentre os resíduos estudados, a poda apresentou a menor densidade, ou seja, é o mais volumoso de todos. Quando não triturada, a densidade era de 41 kg/m<sup>3</sup>. Depois de triturada, a sua densidade

passou a ser 66 kg/m<sup>3</sup>. A densidade dos restos de alimentos oriundos do supermercado, que consistiam basicamente em frutas e verduras ainda inteiros, foi maior do que aqueles oriundos do restaurante da fábrica, que consistiam em grãos cozidos e elementos de aparência “pastosa”. Nesses casos, a densidade medida foi, respectivamente 628 kg/m<sup>3</sup> e 984 kg/m<sup>3</sup>. Depois de triturados, é possível obter uma massa homogênea com uma densidade de 995 kg/m<sup>3</sup>. A densidade do lodo de ETE ficou em um valor intermediário, medido em 733 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 4 – Densidade média aparente dos resíduos.

Resíduo	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Volume de 1 tonelada (m <sup>3</sup> )
Poda não triturada	41	24,4
Poda triturada	66	15,1
Restos de alimento do supermercado	628	1,6
Restos de alimento do restaurante	984	1,0
Restos de alimento triturados	995	1,0
Lodo de ETE	733	1,4

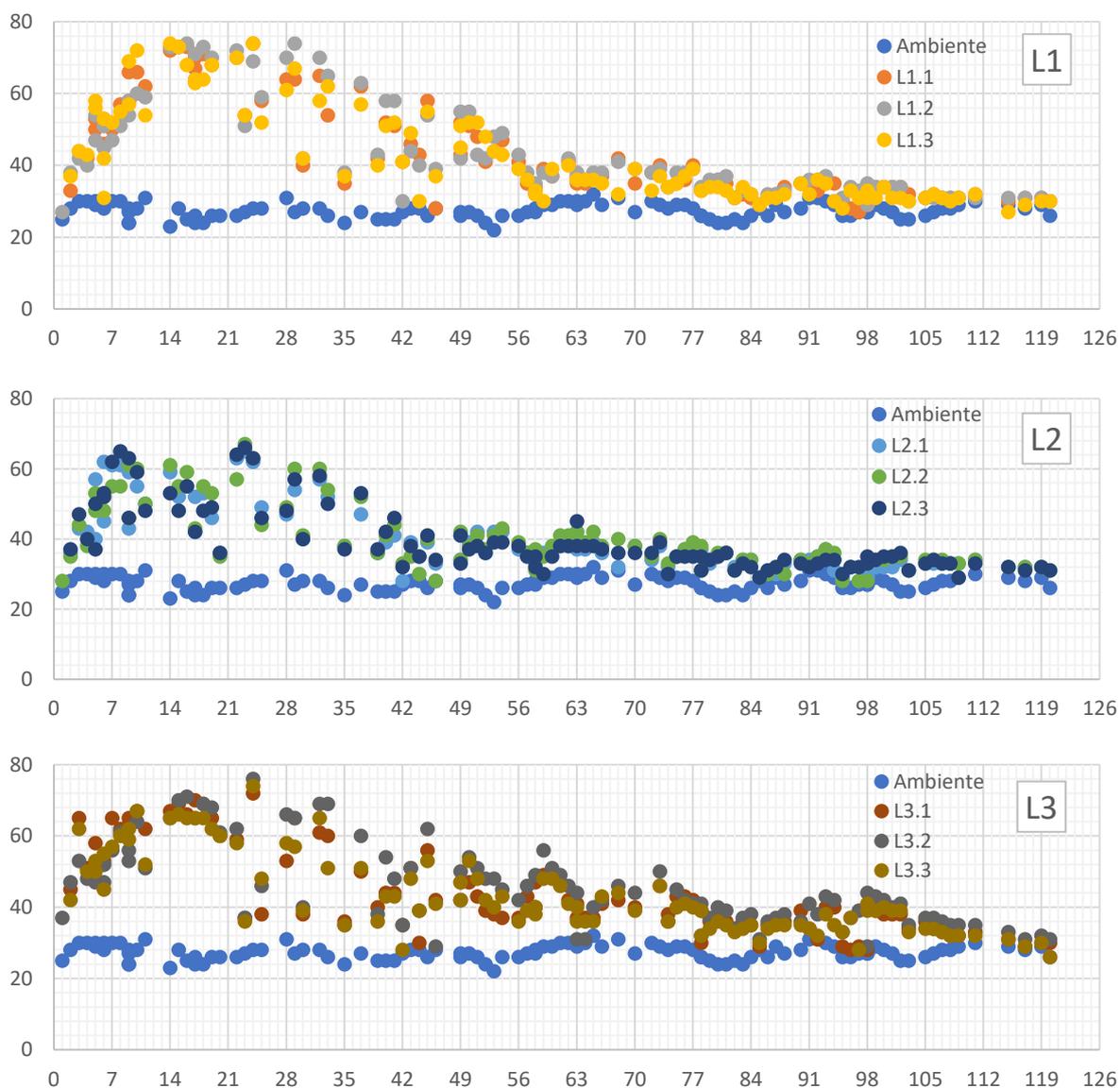
Nota: O volume de 1 tonelada (3ª coluna) é obtido dividindo-se 1000 pelo valor da densidade aparente que foi determinada em laboratório (2ª coluna). Fonte: autor.

A densidade é um parâmetro importante a ser considerado em projeto de compostagem, já que define o espaço necessário para armazenar o material. Observando os volumes calculados na 3ª coluna da Tabela 4, nota-se que somente com a trituração da poda, seria possível reduzir de 24,4 m<sup>3</sup> para 15,1 m<sup>3</sup> o volume ocupado por 1 tonelada desse material, uma redução de 38,0 %. A trituração de restos de alimentos também pode produzir o mesmo efeito, com uma redução de 37,5 %, no caso específico de verduras e legumes triturados, o que não é verdade para resíduos já bastante fracionados (restaurante). Porém, esse é um cálculo simples que deve ser usado com cautela. A densidade aparente apresentada aqui foi determinada usando baldes com pouco mais de 50 litros. Evidentemente, em acumulações de maiores proporções a densidade do conjunto varia com a altura, com maiores densidades na base de uma pilha, pela ação do próprio peso dos resíduos. Utilizar esses valores para dimensionar acumulações maiores resultaria em áreas superestimadas.

### 5.1.3 Temperatura das leiras

O principal parâmetro de controle operacional utilizado no experimento foi a temperatura. A Figura 25 apresenta as medições diárias de temperatura, onde cada ponto do gráfico representa o valor da temperatura medido por cada um dos três sensores em cada leira. Os maiores picos registrados por um único sensor foram 74 °C e 76 °C para L1 e L3, enquanto que o pico para L2 foi menor, de 67 °C.

Figura 25 – Gráfico da temperatura diária das leiras ao longo dos 120 dias de compostagem.



Nota: Cada ponto representa uma medida individual de cada um dos sensores. L1: leira de lodo e restos de alimento; L2: leira de lodo; L3: leira de restos de alimento. Fonte: autor.

A Tabela 5 apresenta os índices de temperatura média, mínima e máxima considerando a média diária dos valores medidos nos três sensores (com exceção da temperatura ambiente, que foi medida com um único sensor). A média de temperatura ambiente no período foi de 27,4 °C, com mínima de 22,0 °C e máxima de 32,0 °C. As leiras L1, L2 e L3 alcançaram, respectivamente, temperaturas médias iguais a 42,6, 39,5 e 44,2 graus celsius. As temperaturas mínimas foram 27, 28 e 29 2 graus celsius.

Tabela 5 – Índices de temperatura média, mínima e máxima durante o todo o período de compostagem.

Índice de temperatura	Ambiente	L1	L2	L3
Média	27,4	42,6	39,5	44,2
Mínima	22,0	27,0	28,0	29,0
Máxima	32,0	73,0	66,0	74,0

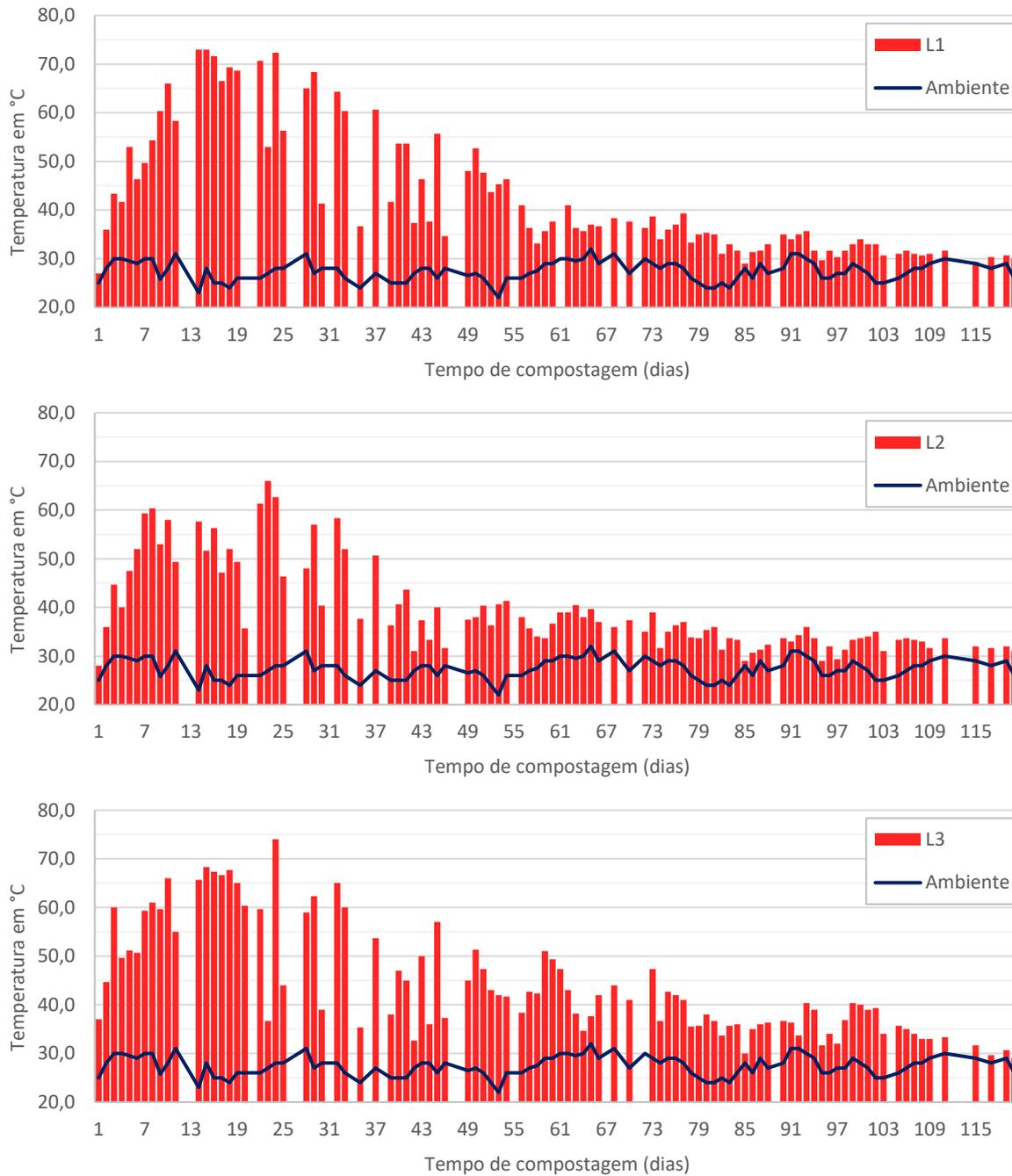
Fonte: autor.

Embora L2 tenha apresentado temperaturas mais amenas, com os menores índices de temperatura média e máxima, as três leiras apresentaram um comportamento semelhante em termos de duração da fase termofílica e início da última fase mesofílica.

Nota-se uma elevação rápida da temperatura, de tal maneira que, em três dias após a montagem das leiras, as temperaturas de todas elas alcançaram mais de 45 °C, marcando o início da fase termofílica. Depois, a temperatura continuou subindo rapidamente e, em menos de uma semana, alcançou valores acima de 50 °C, permanecendo assim por pelo menos 30 dias. A maioria dos picos de temperatura ocorreram entre os dias 15 e 25 – em alguns dias, as temperaturas superaram os 70 °C. Um pouco antes de completar 30 dias, a temperatura começou a baixar gradativamente, até o dia 45 de compostagem, quando começa uma transição para a fase mesofílica. No final do processo, a temperatura volta a se aproximar à temperatura ambiente a partir dos 90 dias de compostagem.

Depois da discussão mais geral, algumas particularidades interessantes podem ser apontadas a respeito das temperaturas. Apresenta-se na Figura 26 as médias diárias dos três sensores em cada leira. Dessa forma é possível verificar as temperaturas de cada leira de uma forma individualizada.

Figura 26 – Temperatura média diária das leiras de compostagem.



Nota: média dos três sensores. Fonte: autor.

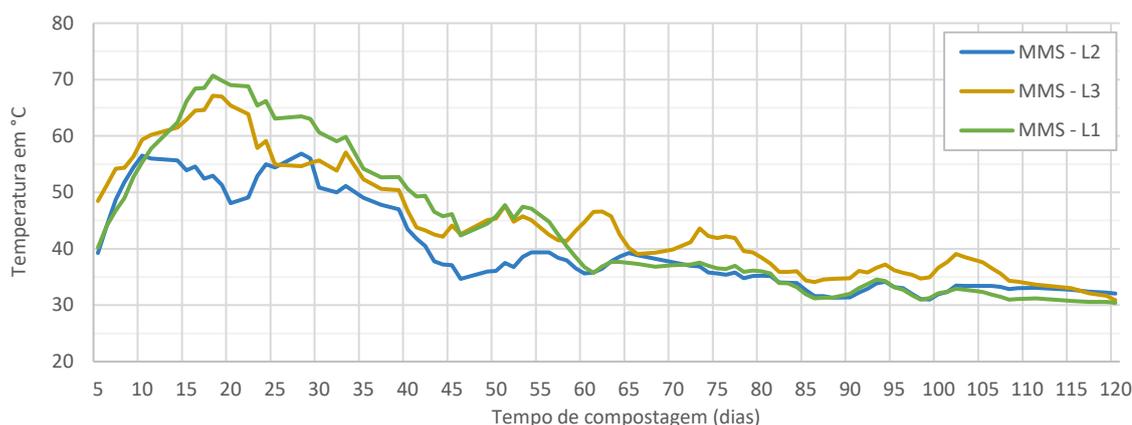
Sobre a L2, destaca-se uma queda inesperada da temperatura logo no início da fase termofílica. A partir do 7 dia, notou-se que enquanto nas outras leiras, L1 e L3, as temperaturas mantinham sua trajetória de ascensão, a L2 começou a baixar lentamente a temperatura, mas ainda superior ao patamar de 50 °C. Após inspeção, observou-se que a L2 (leira que continha apenas lodo de ETE), aparentava uma maior compactação da massa. Em

decorrência desses fatos, para evitar o fim precoce da fase termofílica da L2, decidiu-se pela seguinte intervenção: adicionar um pouco de poda à leira, visando melhorar a aeração e, conseqüentemente, aumentar a atividade microbiológica.

Portanto, no 23º dia de compostagem, todas as leiras receberam uma porção de poda (não somente a L2). A melhora de L2 foi percebida imediatamente, apontando uma temperatura média de 66 °C, prolongando a fase termofílica por mais alguns dias.

Outra forma de observar a temperatura do processo de compostagem é através da média móvel simples de cinco dias (MMS<sub>5</sub>), onde os dados de temperatura ficam mais “suavizados” (Figura 27). Já que a temperatura de cada leira é monitorada utilizando três sensores, a média de cinco dias representa a média de até 15 valores de temperatura.

Figura 27 – Média móvel simples de 5 dias da temperatura das leiras.



Nota: MMS – média móvel simples de cinco dias. Fonte: Autor.

Com base no MMS<sub>5</sub>, é possível verificar quantos dias apresentaram média móvel acima de 40 °C e 55 °C, contagem apresentada na Tabela 6. Dos 120 dias de operação, L3 ficou 55 dias com MMS<sub>5</sub> maior ou igual a 40 °C. Da mesma forma, L1 ficou 42 dias nessa condição. Já a leira L2, que apresentou menores temperaturas, ficou apenas 28 dias, praticamente a metade do tempo de L3. Adotando um limite ainda mais elevado de temperatura, para a média móvel maior ou igual a 55 °C, foram 18 e 16 dias para L1 e L3, respectivamente. Da mesma forma, L2 apresentou menores médias, igualando ou ultrapassando esse limite apenas 6 vezes.

Tabela 6 – Índices de temperatura da média móvel simples de cinco dias.

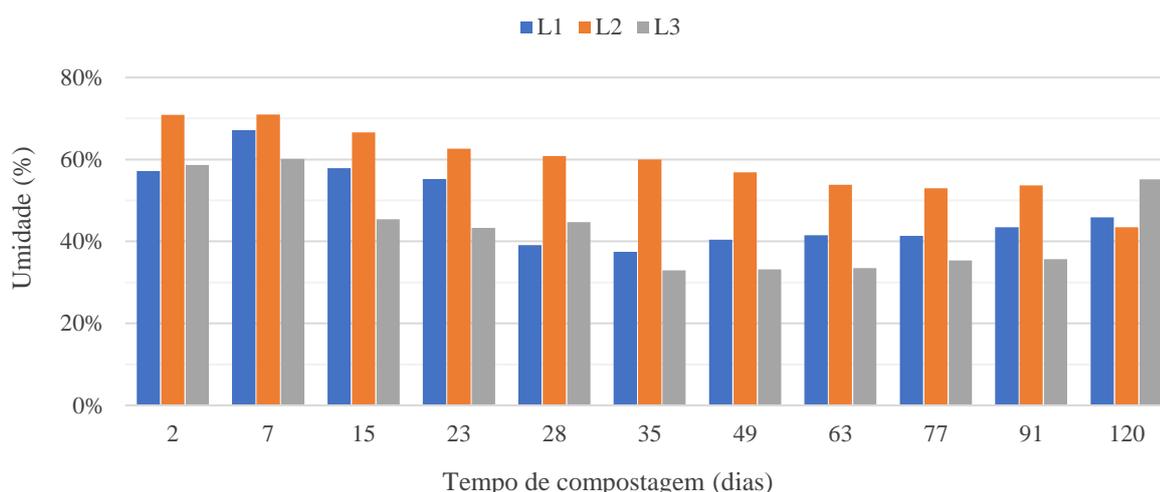
Índice de temperatura	L1	L2	L3
Dias com MMS <sub>5</sub> maior ou igual a 40 °C	42	28	55
Dias com MMS <sub>5</sub> maior ou igual a 55 °C	18	6	16

Nota: MMS<sub>5</sub> – média móvel simples de cinco dias. Fonte: autor.

#### 5.1.4 Umidade das leiras

Os resultados para a determinação da umidade das leiras é apresentado no gráfico de colunas na Figura 28. De forma geral, o processo de compostagem começou com um grau de umidade elevado, acima de 55 %, e apresentou uma tendência de perda de umidade ao longo do tempo, até alcançar níveis em torno de 45 %.

Figura 28 – Umidade relativa das leiras durante o processo de compostagem.



Nota: umidade relativa em termos de massa. Fonte: elaborado pelo autor.

Dentre as três leiras, L2 foi a que apresentou maiores umidades. Esta leira já iniciou com uma umidade elevada – até mesmo acima do recomendado por (KIEHL, 1985), que é 55 % – e permaneceu com altas umidades acima de 60 % até completar 35 dias. Depois, houve uma redução da umidade até a última medição, que foi de 44 %.

Em uma situação oposta, L3 apresentou as menores relações de umidades: iniciou com uma umidade de 59 %, alcançou 60 % no dia 7 e apresentou em seguida uma perda significativa de água até alcançar níveis em torno de 35 %.

Ao lado dos dois extremos descritos anteriormente, L1 apresentou umidade intermediária, iniciando com umidades acima de 55 % que se reduziu para níveis um pouco

acima de 40 %. Considerando a composição das leiras, L2 que só continha lodo de esgoto, apresentou uma tendência de reter mais umidade, enquanto que L3 que só continha restos de alimento, apresentou uma tendência de perder mais umidade. Portanto, L1 pode ter apresentado um comportamento intermediário, já que que continha uma mistura desses resíduos.

É importante registrar que as adições de água para correção da umidade durante os revolvimentos foram baseadas principalmente no teste rápido (Figura 29), conforme orientações de (KIEHL, 1985, p. 287).

Figura 29 – Execução do teste rápido para verificar nível de umidade.



Nota: seqüência da esquerda para direita, tomando com a mão uma porção do composto, pressionando com a mão e visualizando umidade na palma da mão. Fonte: autor.

Devido à suspensão ou à redução das atividades dos laboratórios devido aos protocolos de segurança para contenção da pandemia de COVID-19, as determinações de umidade pelo método de secagem não foram realizadas próximas às datas de coleta de amostras. Em alguns casos, a determinação dos resultados da secagem só foi obtida meses depois da coleta da amostra. Além disso, não havia instrumentos para medir umidade *in situ*. Portanto, o aspecto físico e visual de cada leira era importante para orientar a correção de água (Figura 30). Dessa forma, pode ter ocorrido que uma leira tenha recebido mais água do que outra, ou até mesmo que tenha recebido água em excesso ou em falta.

Figura 30 - Correção da umidade com adição de água durante os revolvimentos.



Fonte: autor.

Nessa inspeção visual, notou-se que L3 apresentava maior dificuldade para correção de umidade porque apresentava um comportamento diferente das outras. Como apresentado na Figura 31, uma porção da água se acumulava no fundo e escorria para fora da leira. Esse processo não foi observado com a mesma intensidade nas outras leiras. Mesmo na tentativa de elevar a umidade de L3, que era frequentemente muito menor do que as outras, uma parte da água escoava e não podia permanecer na leira.

Figura 31 – Água na leira 3 escorre pelo fundo da leira.



**Nota:** as cores podem não ser representativas. **Fonte:** autor.

### 5.1.5 Densidades

Os resultados das medições de densidade aparente das leiras e do composto final são apresentados nas Tabela 7 e Tabela 8. As medições foram feitas uma vez na fase termofílica, no dia 4; e outra vez na fase mesofílica, no dia 81. Observou-se que a leira inicia o processo com uma densidade em torno de 400 kg/m<sup>3</sup>. Na segunda medida, os valores são um pouco menores, em torno de 300 kg/m<sup>3</sup>. Contudo, a densidade de 185 kg/m<sup>3</sup> para L3 ficou discrepante em relação as outras leiras. Desconsiderando o valor de L3, a média entre as outras duas leiras seria 355 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 7 – Determinação da densidade aparente das leiras pelo método do cilindro volumétrico.

Leira	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	
	4º dia	81º dia
L1	399	314
L2	406	396
L3	391	185

Nota: Densidade em kg/m<sup>3</sup>. Fonte: autor.

A densidade inicial da compostagem é um parâmetro importante de dimensionamento, sobretudo de grandes projetos de engenharia. Por isso, as densidades obtidas utilizando o balde cilíndrico foram comparadas com estimativas realizadas durante a montagem das leiras. Alternativamente, a densidade pode ser calculada com base da ficha de montagem e o volume das baias. De acordo com a Tabela 2, L1, L2 e L3 receberam, respectivamente, 739, 782 e 654 quilogramas de resíduos. Tomando as dimensões das baias como referência, cada leira ficou com um volume de 1,35 m<sup>3</sup>, aproximadamente. Portanto, dividindo os primeiros valores pelo volume estimado da ocupação da leira na baia, a densidade inicial de L1, L2 e L3 foi, aproximadamente, 547, 580 e 485 kg/m<sup>3</sup>. Logo, o método da densidade pelo cilindro volumétrico (utilizando o balde) resulta em valores significativamente menores, se comparado com este método. Essa diferença é importante de ser notada, uma vez que, no momento de projetar um pátio de compostagem para grandes quantidades de resíduos, quanto maior a densidade, mais compacta será a leira, logo, menor será a área exigida. Utilizar valores de densidades muito menores do que o real, pode implicar em superdimensionamentos de área.

Conforme apresentado na Tabela 8, ao final foram feitas duas medições, uma antes de passar o composto em peneira (representado pela letra “G” de composto “grosso”) e outra depois da peneira (representado pela letra “C”). O composto após peneiração apresentou uma densidade média de 359 kg/m<sup>3</sup>, valor próximo do material não peneirado. L2 produziu o composto com a maior densidade, enquanto L3 apresentou a menor. No entanto, as diferenças entre as densidades do material “fino” (peneirado) não apresenta grandes diferenças. Já o material grosso retido na peneira, apresentou diferenças importantes. L1, L2 e L3 apresentaram densidade desse material igual a 263, 421 e 178 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Tabela 8 – Densidade do composto final.

Leira	Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
L1	Composto após a peneiração	364
L2		406
L3		308
L1	Material grosso retido na peneira	263
L2		421
L3		178

Fonte: autor.

As diferenças encontradas em termos de densidade podem ser um dos fatores que levaram L3 a apresentar baixa umidade, como foi discutido anteriormente. Nota-se que a densidade do material grosso retido na peneira, que é constituído basicamente do resíduo estruturante (galhos e folhas), oriundo de L3 é a menor de todas as leiras. Isso indica que L3 pode ter recebido uma quantidade proporcionalmente maior de galhos e outros tipos de folhas grandes, em relação às outras leiras.

A densidade do material grosso em L2 foi significativamente maior, mais especificamente, 60 % maior que L1, a segunda maior densidade. Tal fato pode estar relacionada com a formação de uma espécie de “bola” (ou “pedras”) de lodo, uma mistura do composto de lodo com pequenas folhas, gravetos, mas com predominância de lodo (Figura 32). Esse material foi observado durante todo o processo de compostagem, perceptível durante os revolvimentos. Também estava presente em L1, mas com maior intensidade em L2.

Figura 32 – Formação de “bolas” de lodo.



Nota: a caneta preta não faz parte da amostra e foi inserida como referência de tamanho. Foto tirada no dia 32 de compostagem. Fonte: autor.

Durante o revolvimento buscava-se desfazer essas bolas de lodo com as pás e enxadas e com o passar do tempo, as bolas maiores reduziram de tamanho e frequência. Elas se quebravam facilmente à mão quando estavam úmidas (Figura 33), mas quando estavam secas ficava mais difícil parti-las, e “esfarelavam”.

Figura 33 – “Bola” de lodo quebrada ao meio com as mãos usando luvas de proteção.



Fonte: autor.

### 5.1.6 Umidade e capacidade de retenção de água – CRA do composto

Os resultados para a determinação de umidade e capacidade de retenção de água – CRA são apresentadas na Tabela 9. Os valores de umidade para L1, L2 e L3 foram, respectivamente, 41 %, 48 % e 40 %. Neste caso, do ponto de vista da comercialização de fertilizantes orgânicos, os valores obtidos foram positivos porque dispensam qualquer processo de secagem. A Instrução Normativa SDA nº 61/2020, do MAPA, recomenda valores de umidade não superiores a 50% (BRASIL, 2020).

Tabela 9 – Umidade e CRA do composto final.

Leira	CRA	Umidade
L1	166 %	41 %
L2	336 %	48 %
L3	175 %	40 %

Nota: Valor de CRA corresponde à média das duplicatas. Fonte: autor.

Em relação a CRA, L2 apresentou melhor capacidade de retenção de água, com o valor de 336 %, enquanto L1 e L3 apresentaram valores menores, de 166 % e 175 %, respectivamente. Se há uma relação entre a composição das leiras e CRA, os resultados obtidos não permitem afirmar que o lodo oferece maior retenção de água. Esperava-se maiores valores de CRA para L1 (que também apresenta lodo em sua composição), valores intermediários entre L2 e L3 (esta última que só recebeu restos de alimentos). Guermandi (2015), quando realizou compostagem de restos de alimentos, encontrou valores de CRA superiores, na faixa entre 352 % e 534%, utilizando o mesmo método de cálculo. Estes valores são, inclusive, superiores à leira de lodo. Contudo, tais relações devem ser estudadas com maior número de leiras e maior número de variações para verificar essas relações com maior nível de confiabilidade estatística.

### 5.1.7 Impurezas nos resíduos

Foi encontrado uma quantidade elevada de impurezas tanto durante a montagem quando durante o processo de revolvimento e separação do composto final, sobretudo nos

resíduos de poda e capina. Foram encontrados plásticos, papéis, metais e vidros. Os plásticos filme apareceram com maior abundância.

Figura 34 – Impurezas retiradas dos resíduos de poda e limpeza de áreas verdes do campus.



Nota: as fotos podem estar fora de proporção. Fonte: autor.

A seguir são apresentados na Figura 35 alguns itens que chamaram a atenção por apresentarem relação direta com atividades do cotidiano. Foram encontrados diversas embalagens de alimentos (chocolates, sorvetes, balas, bolos e lanches), além de uma

palmilha de calçado. Foi também encontrada uma barra de ferro de construção, que pode ser especialmente danoso aos equipamentos de trituração.

Figura 35 – Destaque para alguns itens encontrados entre as impurezas dos resíduos de poda.



Nota: a caneta preta não faz parte da amostra e foi inserida como referência de tamanho. A foto acima e abaixo podem estar fora de proporção. Fonte: autor.

Conforme apresenta a Figura 36, no lodo de esgoto foram encontrados dois pequenos pedaços de embalagem metálica (à esquerda na imagem), pequenos objetos pretos não identificados (ao centro) e um pedaço de plástico branco duro (à direita). Considerando a

quantidade total de lodo utilizado (mais de 700 kg), a quantidade de impurezas é bastante inferior se comparada com a quantidade encontrada nos resíduos de poda, descritos anteriormente.

Figura 36 – Impurezas encontradas no lodo de ETE.



Nota: a caneta preta não faz parte da amostra e foi inserida como referência de tamanho. Fonte: autor.

A presença de impurezas nos resíduos destinados à compostagem é um elemento fundamental na gestão adequada desses resíduos, tanto do ponto de vista operacional quanto mercadológico (CASTRO, 1996).

A rigor, os itens encontrados não deveriam estar presentes. Em geral, são embalagens de alimentos que deveriam ser adequadamente dispostas para a coleta seletiva de materiais recicláveis. Contudo, é muito frequente a situação de disposição inadequada de resíduos em vias públicas, tanto dentro do campus da USP (onde foram obtidos os resíduos para essa pesquisa) quanto nas ruas da cidade. A Figura 37 apresenta uma situação encontrada dentro do campus da USP: um monte de folhas contendo plástico que é acumulado pelas equipes de limpeza e manutenção de áreas verdes, o mesmo material que foi utilizado nos experimentos.

Figura 37 – Montes de folhas com plástico dentro do campus da USP São Carlos.



Fonte: autor.

Fora do campus também foram encontrados descartes irregulares em um terreno próximo ao campus (Figura 38). Terreno que passa pelos serviços de limpeza urbana do município e deve contribuir para presença de impurezas no composto quando o município iniciar as atividades para compostagem desses resíduos.

Figura 38 – Resíduos sólidos encontrados em terreno às margens da Avenida Trabalhador Sancarlense próximo da entrada do campus da USP São Carlos.



Nota: Imagens fora de proporção. Fonte: autor.

Sem uma segregação adequada, bem como estruturas de acondicionamento com boa disponibilidade à população, campanhas de sensibilização, os resíduos devem chegar no processo de compostagem contendo impurezas, causando problemas para a produção do fertilizante orgânico.

### 5.1.8 Nutrientes no composto

O composto obtido, em todas as leiras, apresentou ao final dos 120 dias, uma relação C/N igual ou inferior a 12, conforme os resultados da análise elementar apresentado na Tabela 10. Na última coluna, o teor de nitrogênio é reescrito em mg por kg.

Tabela 10 – Resultados da Análise Elementar.

Composto	Carbono (%)	Nitrogênio (%)	C/N	Nitrogênio (mg/kg)
Composto 1 - Lodo + Alimento	37,15	3,30	11,3	32.992
Composto 2 - Lodo	31,87	2,66	12,0	26.608
Composto 3 - Alimento	37,28	3,85	9,7	38.457

Nota: Fonte: autor.

A título de comparação, Guermandi (2015) obteve composto de resíduos orgânicos com teores de nitrogênio entre 19.200 e 24.800 mg/kg (ou 1,92 % e 2,48 %, base seca). Massukado (2008) chegou a valores em torno de 21.000 mg/kg. Ambas as autoras trabalharam somente com restos de alimento, não incluíram lodo de esgoto em seus experimentos.

Com o objetivo de elevar os teores de nitrogênio no composto final, é importante assegurar que não haja perdas significativas de nitrogênio ao longo do processo. Uma estratégia para redução de perdas de nitrogênio é a adição de material estruturante com carbono de rápida degradação, disponível logo no início da compostagem (BERNAL; ALBURQUERQUE; MORAL, 2009).

Segundo a IN SDA nº 61/2020, do MAPA, o teor de nitrogênio para fertilizantes simples, mistos ou compostos devem ser superiores a 0,5 %. Já para o teor de carbono, a fração deve ser superior a 15 %. Ambos os limites referidos são iguais para todas as classes de fertilizantes definidas na norma. Sendo assim, todas as leiras, independentemente da matéria prima utilizada, chegaram a uma composição com teores de nitrogênio e carbono

que superam os valores mínimos especificados na instrução normativa, conforme seu art. 8º (BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2020).

Na supracitada norma, há especificações para os valores mínimos de pH, mas neste presente estudo não foram realizadas determinações de pH do composto final. Já em relação a outros parâmetros, como CTC (Capacidade de Troca Catiônica), e outros nutrientes, como potássio e fósforo, não há especificações, apenas “conforme declarado”.

### 5.1.9 Peneiramento

No final do processo de compostagem foi realizado o peneiramento do composto final. A Figura 39 apresenta fotos tiradas do material que mostram seu aspecto visual. A Tabela 11 apresenta os resultados das pesagens do material retido e material fino que passou pela peneira, e os cálculos de rendimento desses materiais em relação a quantidade de resíduos que iniciou o processo de compostagem.

Figura 39 – Aspecto do composto final já peneirado.



Fonte: autor.

Devido à dificuldade de peneirar todo o material da leira utilizando uma peneira manual, apenas uma amostra (uma parte) das leiras foi peneirada. Assim, foi possível obter a proporção de finos e grossos na leira final a partir dessa amostra. A proporção foi extrapolada para o peso final da leira, e o rendimento de finos é calculado em relação ao peso inicial da leira.

Tabela 11 – Pesagem ante e depois do peneiramento.

Dados do peneiramento	L1	L2	L3	Média
Peso inicial da leira (kg)	822,32	939,95	748,49	836,92
Peso final da leira (kg)	379,50	340,80	236,76	319,02
Amostra peneirada (kg)	38,93	86,39	58,66	61,33
Material fino (passante) (kg)	22,07	41,82	25,34	29,74
Material grosso (retido) (kg)	16,86	44,57	33,32	31,58
Proporção de finos	56,7 %	48,4 %	43,2 %	49,4 %
Proporção de grossos	43,3 %	51,6 %	56,8 %	50,6 %
Rendimento de finos*	26,2 %	17,6 %	13,7 %	19,1 %
Rendimento de grossos*	20,0 %	18,7 %	18,0 %	18,9 %

Nota: \*porcentagens em relação ao peso inicial. Fonte: autor.

Percebe-se que no final do processo, praticamente, a leira fica dividida com a metade de material fino e a outra de material grosseiro. No caso da L1, um pouco mais da metade é composta de material fino, enquanto que nos outros casos, L2 e L3, é o contrário – há uma pequena predominância de material grosseiro.

Por fim, tem-se o resultado do rendimento de material fino que é o fertilizante orgânico, com valores bastante variáveis, de 26,2 % para L1, 17,6 % para L2 e 13,7 % para L3. O melhor rendimento, portanto, foi de L1, a leira com uma mistura de lodo e alimentos. Enquanto que L3 teve o pior rendimento.

Quanto ao material grosseiro, há uma média de rendimento de 18,9 %, um valor que pode ser usado como índice de “recirculação”, já que pode ser usado novamente como resíduo estruturante.

## 5.2 Avaliação da viabilidade da proposta de compostagem

Nesta seção é apresentado uma proposta de compostagem para o município de São Carlos, com a avaliação crítica em sobre sua viabilidade e impacto sobre os objetivos e metas do PMGIRS de São Carlos. Inicialmente são apresentados os dados básicos utilizados, as justificativas para os cálculos e dimensões de projeto para o empreendimento, sendo que as equações e procedimentos matemáticos estão descritos em detalhes no memorial de cálculo no Apêndice A.

### 5.2.1 Estimativas das quantidades de resíduos sólidos

Os principais dados básicos sobre população e geração de resíduos com potencial para compostagem foram obtidos através do IBGE, PMGIRS de São Carlos e outros estudos, como apresentado na Tabela 12. Dados sobre população são do último censo e das estimativas do IBGE. Dados sobre geração anual de resíduos são os dados apresentados no próprio PMGIRS do município. A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos - FORSU foi retirada do estudo realizado por (KIM, 2019). Dados sobre densidade e umidade foram obtidos em laboratório, apresentados nas seções anteriores. A geração per capita e outros parâmetros apresentados na tabela foram calculados com base nesses dados ou definidos no âmbito do projeto.

Tabela 12 – Dados sobre população e geração de resíduos sólidos.

Dados	Valores	Unidades	Referências
População do último censo 2010	221.950	habitantes	IBGE
População estimada para 2018	249.415	habitantes	IBGE
População estimada para 2020	254.484	habitantes	IBGE
Geração RSU	67.872	ton.	PMGIRS
FORSU	37,5 %	-	Kim (2019)
Geração de FORSU	25.452	ton.	-
Geração de lodo	4.145	ton.	PMGIRS
Geração de Poda	411	ton.	PMGIRS
Geração RSU per capita	272	kg/hab.ano	-
Geração per capita FORSU	102	kg/hab.ano	-
Geração de lodo per capita	16,62	kg/hab.ano	-
Geração de poda per capita	1,65	kg/hab.ano	-
Incremento anual na geração de RSU	1 %	-	-
Taxa anual de crescimento populacional	1,38 %	-	-

Fonte: autor.

Em particular, a geração de resíduos de poda e capina foram obtidos da seguinte maneira. De acordo com o PMGIRS, os serviços de limpeza urbana são divididos em quatro serviços: varrição; poda; capina e roçada; e desobstrução e limpeza de bueiros e bocas de lobo. Cada um desses serviços geram uma determinada quantidade de resíduos anualmente, conforme indicado na Tabela 13 a seguir. Nos cenários estudados, foram considerados

apenas os serviços de poda e de capina e roçada. Porque estes são mais adequados à produção de fertilizantes orgânicos, uma vez que os outros podem conter quantidade excessiva de impurezas, plásticos em geral, etc. Somados, o volume desses materiais chega a 10.032 m<sup>3</sup> e seu peso, considerando a densidade determinada em laboratório, que foi de 0,041 ton./m<sup>3</sup>, chega a 411,41 toneladas por ano.

Tabela 13 – Resíduos gerados nos serviços de limpeza urbana em São Carlos – SP.

Serviços de limpeza urbana	Geração anual de resíduo (m <sup>3</sup> )
Varrição	1.452
Poda	7.392
Capina e roçada	2.640
Limpeza de bueiros e bocas de lobo	765

Fonte: São Carlos (2020).

Em relação a quantidade de FORSU destinada a compostagem, os valores foram definidos de acordo com o PMGIRS de São Carlos, que define metas em relação a redução da disposição final de resíduos em aterro, observando a ordem de prioridade estabelecida pela PNRS. Especificamente em relação aos resíduos sólidos orgânicos, a meta inicial é a redução de 5 %, aumentando progressivamente até 30 %, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Metas de redução da disposição final de resíduos orgânicos em aterros no município de São Carlos.

Metas PMGIRS	Ano do prazo	Redução (%)	Incremento anual até o prazo (%)
Até o 4 ano	2024	5	1,25
Até o 8 ano	2028	15	2,50
Até o 16 ano	2036	25	1,25
Até o 20 ano	2040	30	1,25

Nota: ano de início 2020. Incremento anual das metas de redução é distribuído igualmente entre os anos de prazo. Fonte: (SÃO CARLOS, 2020).

A proposta para o município considerou um horizonte de projeto de 20 anos, com início em 2020, ou seja, considerou também a capacidade de tratamento de resíduos até 2040, período que coincide com o período de planejamento do PMGIRS de São Carlos.

A geração futura de resíduos foi calculada com base na taxa de crescimento populacional e geração per capita de resíduos apresentados na Tabela 12. O ano de referência para o cálculo de geração per capita foi 2018, com a população estimada pelo IBGE em 249.415 habitantes, já que os dados de geração apresentados no PMGIRS são referentes ao ano de 2018.

Foi considerada a taxa de crescimento anual entre o último censo de 2010 e a população estimada para 2020, conforme os dados do IBGE (Tabela 12). Neste período a taxa de crescimento populacional foi 1,38 % ao ano. Foi calculada a geração per capita anual dos resíduos sólidos urbanos, lodo da ETE e poda. Dentre os três resíduos, o incremento anual na geração per capita foi aplicado apenas para os RSU, no caso, um incremento de 1% ao ano. O resultado das projeções é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados para as estimativas de geração per capita de resíduos sólidos.

Ano	População estimada	RSU per capita (kg/hab.ano)	FORSU per capita (kg/hab.ano)	Geração FORSU (ton.)	Meta de redução (%)	FORSU para compostagem (ton.)	Geração de Lodo (ton.)	Geração de Poda (ton.)
2020	255.453	278	104	26.491	0,00	0	4.229	420
2021	258.972	280	105	27.125	1,25	339	4.287	425
2022	262.538	283	106	27.773	2,50	694	4.347	431
2023	266.154	286	107	28.437	3,75	1.066	4.406	437
<b>2024</b>	<b>269.820</b>	<b>289</b>	<b>108</b>	<b>29.117</b>	<b>5,00</b>	<b>1.456</b>	<b>4.467</b>	<b>443</b>
2025	273.536	292	109	29.813	7,50	2.236	4.529	449
2026	277.303	295	111	30.526	10,00	3.053	4.591	456
2027	281.122	298	112	31.256	12,50	3.907	4.654	462
<b>2028</b>	<b>284.994</b>	<b>301</b>	<b>113</b>	<b>32.004</b>	<b>15,00</b>	<b>4.801</b>	<b>4.718</b>	<b>468</b>
2029	288.919	304	114	32.769	16,25	5.325	4.783	475
2030	292.898	307	115	33.552	17,50	5.872	4.849	481
2031	296.932	310	116	34.354	18,75	6.441	4.916	488
2032	301.022	313	117	35.176	20,00	7.035	4.984	495
2033	305.168	316	118	36.017	21,25	7.654	5.052	501
2034	309.371	319	120	36.878	22,50	8.298	5.122	508
2035	313.632	322	121	37.760	23,75	8.968	5.192	515
<b>2036</b>	<b>317.951</b>	<b>326</b>	<b>122</b>	<b>38.663</b>	<b>25,00</b>	<b>9.666</b>	<b>5.264</b>	<b>522</b>
2037	322.330	329	123	39.587	26,25	10.392	5.336	530
2038	326.769	332	125	40.534	27,50	11.147	5.410	537
2039	331.270	335	126	41.503	28,75	11.932	5.484	544
<b>2040</b>	<b>335.832</b>	<b>339</b>	<b>127</b>	<b>42.495</b>	<b>30,00</b>	<b>12.749</b>	<b>5.560</b>	<b>552</b>

Nota: as linhas dos anos de prazo do PMGIRS estão destacadas em negrito. Geração per capita de lodo e poda são constantes. Fonte: autor.

Em uma avaliação simplificada sobre as quantidades de resíduos, percebe-se que há uma grande desproporção entre os três resíduos estudados. Uma quantidade maior de FORSU é gerada anualmente em relação a quantidade de lodo, que por sua vez é maior comparada a quantidade de poda. Com base nos dados de geração per capita apresentados, a quantidade de resíduo estruturante é bastante limitada e pode impor dificuldades à operação adequada do processo de compostagem, principalmente no que diz respeito à relação C/N e umidade, mas também na estrutura da leira que permite difusão de oxigênio do ar nos espaços vazios. A umidade pode ser controlada mais facilmente com a adição de água quando está baixa, ou com o aumento da frequência de revolvimentos quando em excesso (KIEHL, 1985). É perfeitamente possível realizar a compostagem com baixa relação C/N, porém essa condição pode levar a perdas de nitrogênio pela volatilização da sua forma amoniacal (KIEHL, 1985; SOUZA et al., 2001). Por isso é importante que o município considere em seu planejamento a busca por fontes adicionais de resíduos estruturantes para garantir melhores condições operacionais das leiras de compostagem e melhora na composição final do composto. Inclusive, sabe-se que o município conta com uma área de produção agrícola que pode fornecer materiais como palha de cana, café, milho, etc. (SÃO CARLOS, 2020, p. 262).

Destacando os anos referentes às metas do PMGIRS (linhas em negrito na Tabela 15), foi possível estimar qual será a geração de resíduos com potencial para a compostagem (somando a quantidade gerada de FORSU, lodo e poda), e estimar qual deve ser a quantidade de resíduos desviados do aterro para cumprimento das metas de redução, conforme Tabela 16

Tabela 16. A última coluna da tabela mostra qual seria a “razão” entre essas duas quantidades, o que reflete a efetividade das metas estabelecidas para o município. Em outras palavras, utilizando o ano de 2024 como exemplo, das 34.157 toneladas de resíduos sólidos orgânicos que podem ser efetivamente compostados, apenas 6.390 toneladas seguirão essa destinação se as metas foram cumpridas integralmente, o que representa 18,7 %. Analogamente, em 2040, o montante chegaria a 38,8 %.

Tabela 16 – Relação entre os resíduos com potencial para compostagem e as metas de redução da destinação em aterros.

Ano	Resíduos com potencial para compostagem (1)	Resíduos desviados para compostagem (2)	Razão (3)
2024	34.157	6.390	18,7 %
2028	37.332	10.025	26,9 %
2036	44.618	15.511	34,8 %
2040	48.792	18.932	38,8 %

Nota: (1) soma de todos os resíduos como FORSU, lodo de ETE, poda e capina; (2) assumindo o integral cumprimento das metas de desvio de FORSU e 100 % da destinação de lodo e poda para compostagem; (3) relação entre a terceira e segunda coluna. Fonte: autor.

Idealmente, se for considerado um aumento da meta em 2040, de 30 % para 100 %, na busca pela máxima redução da disposição de resíduos sólidos orgânicos em aterro, a quantidade de FORSU a ser coletada para a compostagem seria aumentada consideravelmente – a quantidade de resíduos seria aumentada em duas vezes e meia, de quase 19 mil toneladas para mais de 48 mil toneladas (última linha da Tabela 16). Tal empenho exigiria a participação não somente de grandes estabelecimentos geradores de resíduos sólidos orgânicos, como aqueles que participaram deste estudo (supermercados, restaurantes, etc.), mas também de toda a população.

Para citar um exemplo, a cidade de São Francisco lidera nos Estados Unidos com a maior porcentagem de desvio de resíduos de seus aterros - desde 2016, a taxa de desvio é de 80 % e a redução da disposição em aterros chegou a 50 % (US EPA, 2022), sendo que os restaurantes da grande cidade são um dos mais importantes parceiros e alcançam taxas de recuperação na ordem de 90 % de seus resíduos (SF ENVIRONMENT, 2022).

## 5.2.2 Definição das etapas de instalação da usina de compostagem

De acordo com as projeções realizadas e as metas estipuladas no planejamento de São Carlos, podem ser definidos três momentos diferentes para implantação da usina de compostagem no município: primeira etapa, até 2024, com uma redução de 5 % de resíduos sólidos orgânicos destinados ao aterro; segunda etapa, referente ao último ano do PMGIRS, até 2040, com uma redução de 30 %; e terceira etapa, na concepção de 100 % de desvio de resíduos sólidos orgânicos.

Tabela 17 – Quantidades de resíduos desviadas para a compostagem.

Resíduo	Primeira etapa	Segunda etapa	Terceira etapa
Lodo (ton.)	4.484,1	5.581,2	5.581,2
FORSU (ton.)	1.461,4	12.797,2	42.657,2
Poda e capina (ton.)	445,0	553,8	553,8
Total de resíduos (ton.)	6.390,5	18.932,1	48.792,1
Entrada diária em massa (ton./dia)	20,4	60,5	155,9
Entrada diária em volume (m <sup>3</sup> )	37,3	110,6	285,0

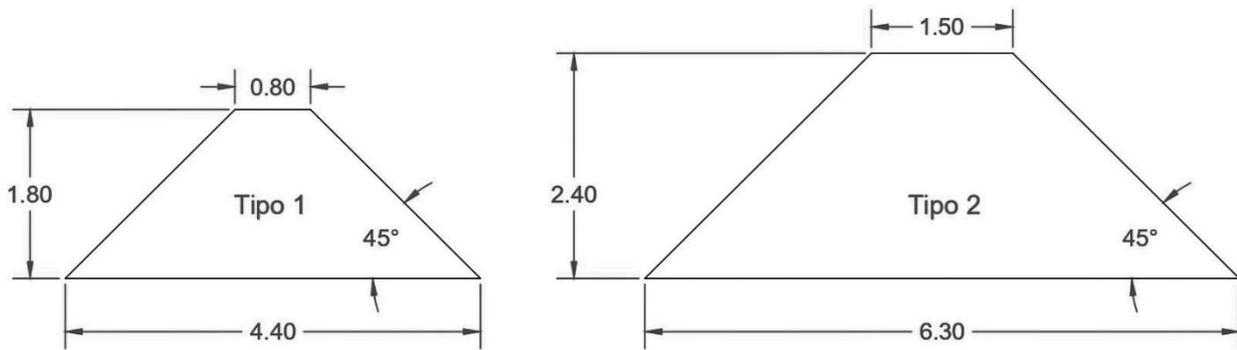
Fonte: autor.

Na primeira etapa, a entrada diária de resíduos orgânicos ficou estimada em 20 toneladas, o que pode ser realizado, sem muitas dificuldades, por um único caminhão de coleta compactador, tipo “trucado”, com capacidade para até 11,5 toneladas por viagem, em duas viagens por dia (de segunda-feira a sábado).

### 5.2.3 Dimensionamento da área de compostagem

Para melhor clareza na apresentação dos resultados, os procedimentos matemáticos são apresentados em um memorial de cálculo foi separado no Apêndice A. Primeiramente, de acordo com as etapas definidas anteriormente, a apresenta os resultados dos cálculos das áreas de compostagem em função de dois tipos de revolvimento: um que utiliza revolvedor tracionado, geralmente, limitado a leiras com alturas não superiores a 2,0 metros (leira tipo 1); e outro que utiliza revolvedor autopropelido, que é capaz de revolver leiras maiores (leira tipo 2) (Figura 40). Ambas as leiras foram dimensionadas com seção transversal em forma trapezoidal. As respectivas dimensões também são apresentadas na Tabela 18.

Figura 40 – Dimensões das leiras de seção trapezoidal.



Fonte: autor.

Tabela 18 – Dimensões das leiras de compostagem de acordo com o equipamento de revolvimento.

Tipo de leira	Leira tipo 1	Leira tipo 2
Equipamento de revolvimento	Tracionada	Autopropelida
Altura (m)	1,80	2,40
Base maior (m)	4,40	6,30
Base menor (m)	0,80	1,50
Inclinação da leira	45°	45°
Área da seção transversal (m <sup>2</sup> )	4,68	9,36
Faixa de locomoção (m)	3,00	2,00
Coefficiente de revolvimento	1,68	1,32

Fonte: autor.

Definidas as dimensões das leiras, e com as estimativas de volume de resíduos que devem ser processados diariamente, foi possível calcular o comprimento total de uma leira e sua área em planta, ou seja, o espaço ocupado por um dia de resíduo distribuído em uma leira (Tabela 19). Essas medidas são fundamentais para o cálculo posterior das áreas requeridas para todo o período de 120 dias de compostagem.

Tabela 19 – Área ocupada pela leira formada pela entrada diária de resíduos.

Configuração	Leira tipo 1			Leira tipo 2		
	Primeira etapa	Segunda etapa	Terceira etapa	Primeira etapa	Segunda etapa	Terceira etapa
Orgânicos (ton./dia)	20,4	60,5	155,9	20,4	60,5	155,9
Volume diário (m <sup>3</sup> )	37,3	110,6	285,0	37,3	110,6	285,0
Comprimento da leira (m)	8,0	23,6	60,9	4,0	11,8	30,4
Área em planta da leira (m <sup>2</sup> )	35,1	104,0	267,9	25,1	74,4	191,8

Fonte: autor.

A partir dos cálculos das leiras individuais, as áreas totais requeridas pelo processo de compostagem podem ser obtidas (Tabela 20). Neste caso, foram definidos, de acordo com os tempos observados em laboratório, 45 dias de degradação ativa e 75 dias de maturação, completando 120 dias de compostagem, mais 30 dias de tempo de armazenamento. Também foi definida uma área complementar de 20 %.

Tabela 20 – Áreas requeridas para o processo de compostagem em função das etapas do planejamento.

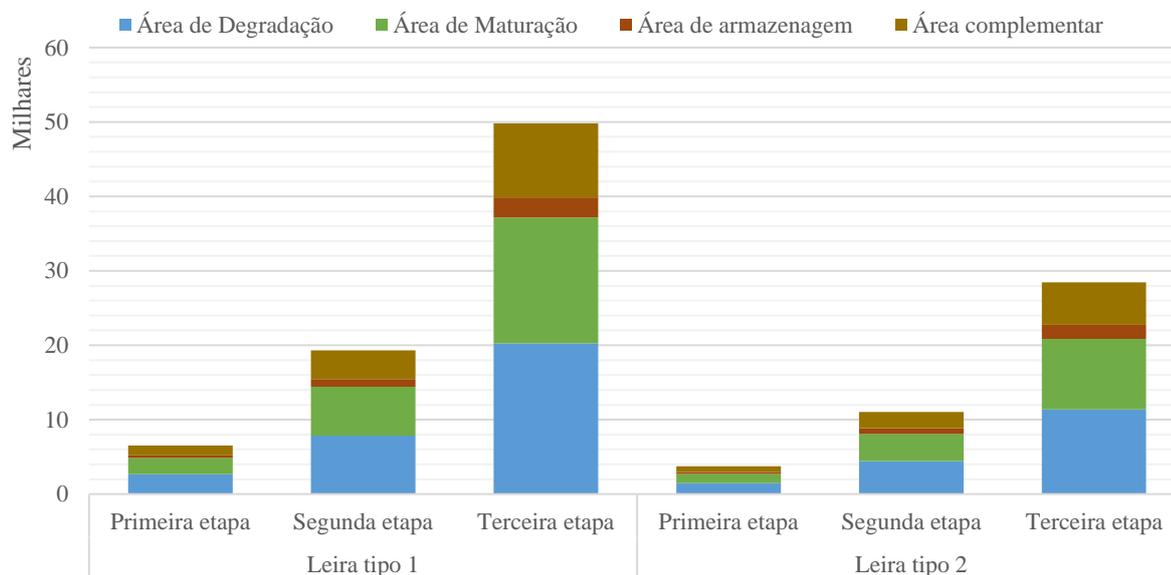
Configuração	Leira tipo 1			Leira tipo 2		
	Primeira etapa	Segunda etapa	Terceira etapa	Primeira etapa	Segunda etapa	Terceira etapa
Área de Degradação (m <sup>2</sup> )	2.656	7.868	20.278	1.489	4.412	11.372
Área de Maturação (m <sup>2</sup> )	2.213	6.557	16.898	1.241	3.677	9.477
Área de armazenagem (m <sup>2</sup> )	351	1.040	2.679	251	744	1.918
Área complementar (m <sup>2</sup> )	1.305	3.866	9.964	745	2.208	5.692
Área total (m <sup>2</sup> )	6.525	19.330	49.819	3.727	11.042	28.458

Nota: tempo de degradação ativa, maturação e armazenamento foram definidos como 45, 75 e 30 dias respectivamente. Fonte: autor.

Na primeira etapa, para atingir a primeira meta do plano, a área total requerida para a usina de compostagem foi calculada em 6.525 m<sup>2</sup>, se for utilizado o revolvedor tracionado, com leiras medindo 1,8 metros de altura e 4,4 metros de largura. Na segunda etapa a área deve ser expandida em 3 vezes, se for mantido o mesmo tipo de revolvedor, mais precisamente, para uma área de 19.330 m<sup>2</sup>. Utilizando o revolvedor autopropelido, com leiras de 2,1 metros de altura e 6,3 metros de largura, o requerimento de área é

significativamente reduzido para 3.727 m<sup>2</sup> na primeira etapa, e 11.042 m<sup>2</sup> na segunda etapa. A ordem de grandeza e os valores são ilustrados no gráfico de colunas da Figura 41.

Figura 41 – Gráfico das áreas de compostagem.



Nota: área em metros quadrados. Fonte: autor.

De acordo com esses cálculos, o revolvedor autopropelido pode proporcionar uma economia de área da ordem de 50 %, ou seja, o revolvedor autopropelido requer a metade da área do revolvedor tracionado. Isso ocorre porque a escolha do equipamento de revolvimento tem grande influência no dimensionamento da área de compostagem. Enquanto o revolvedor tracionado está limitado às leiras menores, o revolvedor autopropelido possibilita, na mesma área, a operação com leiras maiores, mais altas. Além disso, ao contrário do revolvedor tracionado que precisa se deslocar ao lado da leira, o revolvedor autopropelido tem a capacidade de transitar por cima das leiras, necessitando de menor espaço operacional entre as leiras – o que implica em um coeficiente de revolvimento menor. Este é um fator bastante importante para municípios com dificuldade para encontrar área disponível.

Considerando o custo elevado dos revolvedores autopropelidos, uma estratégia que pode ser interessante é investir inicialmente em tratores e no revolvedor tracionado, que é mais barato, e num segundo momento, faz-se o investimento no equipamento autopropelido. Nota-se que, utilizando o mesmo equipamento, da primeira etapa para a segunda etapa, a expansão do empreendimento deve implicar em uma área total três vezes maior. Com a

aquisição de revolvedores de maior capacidade, a área seria reduzida pela metade. No caso em estudo, partindo de uma área inicial de 6,5 mil m<sup>2</sup>, com o revolvedor tracionado, o investimento em um revolvedor autopropelido em uma segunda etapa evitaria uma expansão para 19,3 mil m<sup>2</sup>, mas com ele seria necessária uma expansão para apenas 11,0 mil m<sup>2</sup>.

#### 5.2.4 Estimativas da produção de composto

Baseado nos dados obtidos em laboratório sobre o rendimento das peneiras (duas últimas linhas da Tabela 11), foi possível estimar a produção de composto ao final dos 120 dias do processo, conforme a Tabela 21 a seguir. Também é apresentado uma estimativa para o material grosseiro (retido nas peneiras), que ficou com uma taxa de conversão de 20 % em relação ao que entra no processo. A taxa de produção de composto ou fertilizante orgânico é de 26 %, o que resulta numa expectativa de 1.278 toneladas por ano na primeira etapa, passando por 3.786 toneladas na segunda etapa, e 9.758 toneladas, na terceira etapa, caso o município busque 100 % de desvio de FORSU dos aterros.

Tabela 21 – Estimativas sobre a produção de composto e material grosseiro no final da compostagem.

Dados	Primeira etapa	Segunda etapa	Terceira etapa
Taxa de conversão para grosseiros*	20 %	20 %	20 %
Produção de grosseiros (ton./ano)	1.278	3.786	9.758
Taxa de conversão para composto*	26 %	26 %	26 %
Produção de composto (ton./ano)	1.674	4.960	12.784
Produção média mensal (ton./mês)	140	413	1.065
Produção média diária (ton./dia)	5,3	15,8	40,8
Densidade do composto	0,36	0,36	0,36
Volume diário (m <sup>3</sup> /dia)	14,86	44,02	113,45

Nota: \* taxas de conversão obtidas em laboratório, para a leira com mistura de lodo e alimentos. Fonte: autor.

O fertilizante produzido pode ser comercializado ou utilizado nos serviços públicos de manutenção de áreas verdes na cidade. Segundo levantamento no site MFRURAL, o preço do fertilizante orgânico, ou “adubo orgânico”, está na média de 175,00 reais por tonelada. Tomando esse preço médio e considerando apenas a segunda etapa, a venda de todo o material pode garantir uma receita mensal de R\$ 72.336,52.

### 5.2.5 Localização da usina de compostagem

Não foi realizado estudo de localização para a usina visando a otimização logística do processo de compostagem. Mas tomando como princípios a eficiência e a razoabilidade, é possível assumir, de forma objetiva, que uma boa localização para a usina de compostagem seja dentro da área do aterro sanitário municipal, instalação gerenciada por meio de parceria público-privada.

O aterro de São Carlos tem área total de mais de 570 mil m<sup>2</sup>, dos quais aproximadamente 150 mil m<sup>2</sup> possui algum tipo de uso, atualmente. Dada essa disponibilidade, seria razoável a proposta de utilização de parte da área do aterro para a instalação da usina de compostagem, conforme a Figura 42. Nesta figura, é apresentado apenas o cenário com revolvimento tracionado, o cenário que exige maior área. Assim, é possível ter uma ilustração da proporção da usina em relação a zona de disposição do aterro, ao norte da foto.

Figura 42 – Proposta de localização da usina de compostagem por revolvimento tracionado nos limites do aterro sanitário de São Carlos.



Nota: O aterro sanitário possui área total de cerca de 570.000 m<sup>2</sup>. Fonte: autor.

A concretização de tal proposta necessita de estudo de compatibilização que garanta a inexistência de conflitos entre o plano de operação da usina de compostagem e do aterro sanitário, e que também observe aspectos relacionados a regulamentação da parceria público-privada e repartição de custos entre os parceiros. Essas questões estão fora do escopo deste estudo por duas razões: para permitir a objetividade da análise de viabilidade neste momento da investigação; e para simplificar, reduzindo o número de elementos que precisam ser considerados nesta proposta de usina. Importante salientar que, se for possível a compatibilização, os custos com investimento público podem ser reduzidos significativamente com o aproveitamento conjunto de estruturas preexistentes no aterro, como estruturas de controle de acesso, balança de veículos pesados, máquinas e equipamentos, edifícios de apoio, estradas e vias de acesso, rede monitoramento de águas subterrâneas, centro de educação ambiental, etc.

## 5.2.6 Lista de equipamentos

Do levantamento realizado para conhecimento dos equipamentos utilizados em usinas de compostagem, resulta a Quadro 3. Os itens são divididos entre compostadores (equipamentos de revolvimento), tratores, trituradores, peneiras, e pás carregadeiras.

Quadro 3 – Lista de equipamentos usados em usinas de compostagem.

Equipamento	Observações	Marca	Produtividade
Compostador CIVEMASA CRO 4.0	Tracionado; largura e altura de 4,0 e 1,5 metros;	CIVEMASA	690 m <sup>3</sup> /h
Compostador CIVEMASA CRO 4.0 com kit sulcador	Tracionado; largura e altura de 4,0 e 1,5 metros;	CIVEMASA	690 m <sup>3</sup> /h
Compostador CIVEMASA CRO 4.0 com kit sulcador e pulverizador	Tracionado; largura e altura de 4,0 e 1,5 metros;	CIVEMASA	690 m <sup>3</sup> /h
Compostador JC 2500	Tracionado; largura e altura de 2,5 e 1,3 metros; Trator de 55 a 85 CV;	Jaguar Máquinas (Grupo Allmac)	200 a 250 m <sup>3</sup> /h ou 250 m <sup>3</sup> /h
Compostador JC 4000	Tracionado; largura e altura de 4,0 e 1,5 metros; Trator de 90 CV;	Jaguar Máquinas (Grupo Allmac)	200 a 250 m <sup>3</sup> /h ou 600 m <sup>3</sup> /h
Compostador Menart SP-30	Tracionado; largura e altura de 3,4 e 1,7 metros; sem necessidade de creeper, pois o compostador empurra o trator.	Menart	1100 m <sup>3</sup> /h
Compostador Menart SP-40	Tracionado; largura e altura de 4,4 e 1,8 metros; sem necessidade de creeper, pois o compostador empurra o trator.	Menart	1800 m <sup>3</sup> /h
Compostador Menart SP-45	Tracionado; largura e altura de 4,9 e 1,9 metros; sem necessidade de creeper, pois o compostador empurra o trator.	Menart	2100 m <sup>3</sup> /h
Compostador Menart SP-50	Tracionado; largura e altura de 5,4 e 2,0 metros; sem necessidade de creeper, pois o compostador empurra o trator.	Menart	2500 m <sup>3</sup> /h
Compostador Menart SP-60	Tracionado; largura e altura de 6,4 e 2,2 metros; sem necessidade de creeper, pois o compostador empurra o trator.	Menart	4000 m <sup>3</sup> /h
Compostador Menart SPM-36	Autopropelido; largura máx. e altura de 3,9 e 1,7 metros;	Menart	2000 m <sup>3</sup> /h
Compostador Menart SPM-47	Autopropelido; largura máx. e altura de 4,9 e 1,9 metros;	Menart	3000 m <sup>3</sup> /h
Compostador Menart SPM-58	Autopropelido; largura máx. e altura de 5,9 e 2,1 metros;	Menart	4000 m <sup>3</sup> /h
Compostador Menart SPM-63	Autopropelido; largura máx. e altura de 6,3 e 2,4 metros;	Menart	5300 m <sup>3</sup> /h
Compostador Menart SPM-73	Autopropelido; largura máx. e altura de 7,3 e 2,8 metros;	Menart	7000 m <sup>3</sup> /h

(continua)

(continuação)

Equipamento	Observações	Marca	Produtividade
Compostador Renova 2.5	Tracionado; largura e altura de 2,5 e 1,3 metros; Trator de 75 a 85 CV;	EcoAgrícola	2,01 m <sup>3</sup> lineares e 200 a 250 m/h
Compostador Renova 4.0	Tracionado; largura e altura de 4,0 e 1,8 metros; Trator de 90 a 120 CV;	EcoAgrícola	3,45 m <sup>3</sup> lineares e 200 a 250 m/h
Compostador Renova 4.5	Tracionado; largura e altura de 4,5 e 1,8 metros; Trator de 140 a 170 CV;	EcoAgrícola	4,59 m <sup>3</sup> lineares e 200 a 250 m/h
Compostador Renova 5.0	Tracionado; largura e altura de 5,0 e 1,8 metros; Trator a partir de 170 CV;	EcoAgrícola	5,04 m <sup>3</sup> lineares e 200 a 250 m/h
Compostador Vermeer CT612	Tracionado	Vermeer	1500 ton./h
Compostador Vermeer CT718	Autopropelido	Vermeer	4530 ton./h
Pá carregadeira CASE 621E	Peso operacional 11.945 kg com caçamba de 3m <sup>3</sup> .	CASE	s.d.
Pá carregadeira CAT 914k	Equipada com cabine fechada, ar-condicionado, pneus 17,5x25", caçamba de 1,6 m <sup>3</sup> .	Caterpillar	s.d.
Pá carregadeira CAT 920k	Equipada com cabine fechada, ar-condicionado, pneus 17,5x25", caçamba de 1,9 m <sup>3</sup> .	Caterpillar	s.d.
Pá carregadeira CAT 924k	Equipada com cabine fechada, ar-condicionado, pneus 17,5x25", caçamba de 1,3 m <sup>3</sup> .	Caterpillar	s.d.
Pá carregadeira CAT 930k	Equipada com cabine fechada, ar-condicionado, pneus 20,5x25", caçamba de 2,5 m <sup>3</sup> .	Caterpillar	s.d.
Pá carregadeira CAT 938k	Equipada com cabine fechada, ar-condicionado, pneus 20,5x25", caçamba de 2,7 m <sup>3</sup> .	Caterpillar	s.d.
Pá carregadeira Hyundai HL740-9	Pá com 2,5 m <sup>3</sup>	Hyundai	s.d.
Pá carregadeira Hyundai HL757-9	s.d.	Hyundai	s.d.
Pá carregadeira Hyundai HL760-9	s.d.	Hyundai	s.d.
Pá carregadeira Volvo L60F	Peso operacional 11.370 kg	Volvo	s.d.
Peneira Lippel CLR 1200 x 3000	s.d.	Lippel	s.d.
Peneira Lippel CLR 1500 x 5000	s.d.	Lippel	s.d.
Peneira Pezzolato L3000	Versão com motor elétrico de 20 CV;	Pezolato	20 a 40 m <sup>3</sup> por hora
Peneira Vermeer TR626	s.d.	Vermeer	20 a 40 m <sup>3</sup> por hora
Trator John Deere	Potência acima de 100 CV	John Deere	N/A

(conclusão)

Equipamento	Observações	Marca	Produtividade
Trator LS Plus 100	Potência acima de 100 CV	LS Tractor	N/A
Trator MF 6712	Equipado com super creeper.	Massey Ferguson	N/A
Triturador de galhos Lippel PDU 200/260	Triturador de galhos e picador de troncos; motor a diesel de 40 a 60 HP;	Lippel	12 a 15 m <sup>3</sup> /h
Triturador de galhos Lippel SCORPION PTU 300	Triturador de galhos e picador de troncos; motor a diesel de 60 a 85 HP; não possui caçamba própria, mas pode ser acoplado a um caminhão basculante.	Lippel	30 m <sup>3</sup> /h
Triturador de galhos Lippel SCORPION PTU 350	Triturador de galhos e picador de troncos; motor a diesel de 85 a 140 HP; não possui caçamba própria, mas pode ser acoplado a um caminhão basculante.	Lippel	30 m <sup>3</sup> /h
Triturador Menart H-102	Pode ser acoplado ao trator;	Menart	Até 30 m <sup>3</sup> /h
Triturador Menart H-121	Pode ser acoplado ao trator;	Menart	Até 50 m <sup>3</sup> /h
Triturador Menart P-145	Pode ser acoplado ao trator;	Menart	Até 200 m <sup>3</sup> /h
Triturador Menart P-160	Pode ser acoplado ao trator;	Menart	Até 300 m <sup>3</sup> /h
Triturador Vermeer BC1000	Importado	Vermeer	s.d.
Triturador Vermeer BC1800	Importado	Vermeer	s.d.
Distribuidor Exata 10000	Altura máxima da esteira lateral de 1,75 metros; Potência do trator de 90 a 120 CV;	EcoAgrícola	Capacidade de 4,8 m <sup>3</sup>
Distribuidor Exata 15000	Altura máxima da esteira lateral de 1,75 metros; Trator a partir de 120 CV;	EcoAgrícola	Capacidade de 8,0 m <sup>3</sup>

Nota: N/A – não se aplica; s.d. – sem dados. Fonte: autor.

Os modelos de revolvedores tracionados, chamados de compostadores, possuem produtividade significativamente menores que os revolvedores autopropelidos. Entre os compostadores tracionados, a produtividade varia de 250 a 4000 m<sup>3</sup>/h. Já entre os autopropelidos, a produtividade aumenta significativamente e pode chegar até 7000 m<sup>3</sup>/h. Os que possuem maior produtividade são os modelos da marca belga Menart e da americana

Vermeer. As marcas nacionais EcoAgrícola, CIVEMASA e Jaguar oferecem opções para uma produtividade máxima de, aproximadamente, 1250 m<sup>3</sup>/h.

Desse levantamento, não foram encontrados revolvedores autopropelidos de fabricação nacional. Os dois modelos listados, são também das duas marcas citadas, Menart e Vermeer. Tal situação pode impor custos importantes em função dos preços de equipamentos, já que os importados, que são cotados em dólar, são os equipamentos com as maiores capacidades.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de compostagem empregado para o tratamento dos diferentes tipos de resíduos sólidos orgânicos testados apresentou boas condições de temperatura e umidade. Além disso, resultou em composto estável com relação C/N menor ou igual a 12, compatível com a exigência mínima da Resolução CONAMA 481/2017 e IN SDA nº 61/2020, do MAPA, que requerem valores menores ou iguais a 20. A concentração de nitrogênio ficou em torno de uma média de 32.686 mg/kg (base seca), uma concentração menor do que aquelas encontradas em fertilizantes químicos – o que não causou nenhuma surpresa, afinal há diferenças importantes entre esses dois tipos de fertilizantes (ALVARENGA et al., 2015; FIALHO, 2007). A capacidade de retenção de água variou entre 166 % e 336 %, onde a máxima foi do composto com apenas lodo. Os teores máximos de umidade e os teores mínimos de nitrogênio e carbono especificados na nº 61/2020, do MAPA, foram respeitados em todas as leiras, para as diferentes matérias-primas, seja apenas lodo, seja apenas restos de alimentos, ou mesmo a mistura de ambos.

O composto derivado de lodo produzido no experimento atende aos requisitos da Resolução CONAMA 375/06 no que diz respeito ao procedimento para remoção de patógenos, tempo de residência e temperatura. As três leiras estudadas permaneceram 30 dias com temperaturas iguais ou superiores a 50 graus celsius, e 15 dias com 55 graus celsius. Os parâmetros relativos a metais pesados e teste microbiológicos para coliformes termotolerantes, Salmonella, ovos viáveis de helmintos e vírus não foram realizados. Em estudos futuros, é essencial a determinação do grau de contaminação por metais e quais limitações serão impostas para a aplicação do composto, considerando os parâmetros restritivos de carga acumulada teórica permitida de substâncias inorgânicas pela aplicação do composto, de acordo com a Resolução CONAMA 375/2006.

As três composições de leiras influenciaram no processo de compostagem, sendo que não há evidências estatísticas relevantes nesse estudo que permitam afirmar com bom nível de confiança sobre como e o quanto que cada composição pode influenciar individualmente nos teores de nitrogênio, capacidade de retenção de água, umidade e temperaturas. Esta é uma dificuldade de estudos sobre compostagem que precisam criar, em laboratório, muitas repetições com grandes volumes de leiras. Triplicatas de leiras, ou até mesmo duplicatas, que podem chegar a mais de dois metros cúbicos implicam em áreas extensas para a montagem das leiras e necessitam de tempo e pessoal habilitado para realizar

o revolvimento, se não houver disponibilidade de outros métodos que não o mecânico. Para as três leiras, foi utilizada uma área de 23 m<sup>2</sup>, utilizando baias que permitem alteamento do material e conseqüentemente otimização do espaço. Nesse contexto, seria interessante o desenvolvimento de biorreatores de bancada, como aqueles criados por pesquisadores da Embrapa (GREGIO, 2018).

Tendo em vista os objetivos do PMGIRS de São Carlos, as metas de redução da disposição de resíduos sólidos orgânicos em aterros são progressivas, ao longo de 20 anos de planejamento. A meta inicial é de 5 % até 2024, e a meta final, até 2040 é reduzir em 30 %. Para tanto, estima-se que o município deverá dispor de uma capacidade em processo de compostagem mecanizada para mais de 12.797 toneladas da FORSU gerada anualmente. Considerando ainda os resíduos de lodo de ETE e poda e capina, somam-se a esse montante, respectivamente, 5.581 e 554 toneladas, o que resulta em uma capacidade total de 18.932 toneladas. Estima-se também que a área para tal empreendimento deve ser de 1,9 hectares, se forem utilizados revolvedores tracionados, e 1,1 hectares, se forem autopropelidos. Portanto, equipamentos com capacidade de trabalhar com leiras de altura elevadas permitem reduzir significativamente os requerimentos de área para esse tipo de empreendimento, como é o caso dos revolvedores autopropelidos.

O trabalho deu ênfase a sistemas centralizados de compostagem, contudo, os sistemas descentralizados podem desempenhar um papel fundamental na sensibilização das comunidades, atuando também como centros de educação ambiental (MASSUKADO, 2008). Mas possuem uma limitação física, já que a maioria das experiências de sistemas descentralizados com revolvimento manual tem capacidade para o tratamento de até 1 (uma) tonelada por dia (MASSUKADO, 2008, p. 171). Para colocar em perspectiva, seriam necessárias mais de 20 unidades como estas para atender sozinhas a primeira meta, até 2024, da redução da disposição em aterro de resíduos sólidos orgânicos no município de São Carlos. Por isso a conjugação de ambos os sistemas, centralizados e descentralizados, é importante, estabelecendo diferentes campos de enfrentamento aos desafios da gestão de resíduos sólidos.

A concepção e operação de sistemas de gestão de resíduos é complexa, envolve também outras questões de natureza técnica, política, social, etc. (ELALAMI et al., 2019). Por isso, qualquer iniciativa para o tratamento de resíduos, incluindo a compostagem,

necessitam da integração de diversas políticas setoriais no município para garantir a melhoria contínua dos sistemas de gestão de resíduos em São Carlos.

Os primeiros anos da operação da usina de compostagem serão fundamentais para o acúmulo de conhecimento sobre as necessidades reais do empreendimento (tempo de aeração, produtividade das máquinas, quantidade de mão de obra ideal, etc.), os quais serão decisivos para escolha de tecnologias de maior escala que serão utilizadas nas etapas finais do projeto. Tendo isso em vista, a aproximação de todas as entidades da administração pública, sociedade civil e universidades deve ser incentivado para que a produção de conhecimento sobre a compostagem seja democratizada e difundida em outros municípios do país.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13591: Compostagem**. Rio de Janeiro: ABNT, mar. 1996.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, maio 2004.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA URBANA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, dez. 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 31 jan. 2022.

ALFREIDER, A. et al. Microbial community dynamics during composting of organic matter as determined by 16S ribosomal DNA analysis. **Compost Science and Utilization**, v. 10, n. 4, p. 303–312, 2002.

ALVARENGA, P. et al. Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. **Waste Management**, v. 40, p. 44–52, 1 jun. 2015.

BARREIRA, L. P.; PHILIPPI, A.; RODRIGUES, M. S. Usinas de compostagem do Estado de São Paulo: qualidade dos compostos e processos de produção. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 385–393, 2006.

BELTRAME, M. J. L.; BELTRAME, K. G.; OLIVEIRA, F. C. **Composting In Brazil**. Disponível em: <<https://www.biocycle.net/composting-in-brazil/>>. Acesso em: 4 jan. 2022.

BERNAL, M. P. et al. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. **Bioresource Technology**, v. 63, n. 1, p. 91–99, 1 jan. 1998.

BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 22, p. 5444–5453, 1 nov. 2009.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. DE. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. In: SPADOTTO, C. A.; RIBEIRO, W. C. (Eds.). **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. 1. ed. Botucatu: FEPAF - Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2006. p. 181–204.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. rev. ed. Brasília: MAPA, 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa SDA nº 61: estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura**. Brasília, 2020.

CASTRO, M. C. A. A. DE. **Avaliação da eficiência das operações unitárias de uma usina de reciclagem e compostagem na recuperação dos materiais recicláveis e na transformação da matéria orgânica em composto**. São Carlos: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 30 jul. 1996.

CECHIN, ANDREI. **A natureza como limite da economia: a contribuição de Nicholas Georgescu-Roegen**. São Paulo: Senac e Edusp, 2010.

COSTA, P. et al. A dependência de importações no suprimento da demanda de fertilizantes no Brasil e sua entrada pelo porto de Santos. **Revista Produção Industrial & Serviços**, v. 5, n. 2, p. 53–65, 21 dez. 2018.

DE BERTOLDI, M.; VALLINI, G.; PERA, A. The biology of composting: A review. **Waste Management & Research**, v. 1, n. 2, p. 157–176, 1 jun. 1983.

DE SIQUEIRA, T. M. O.; ASSAD, M. L. R. C. L. Composting of municipal solid waste in the state of Sao Paulo (Brazil). **Ambiente e Sociedade**, v. 18, n. 4, p. 235–258, 2015.

DONAGEMA, G. K. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

ELALAMI, D. et al. Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 114, p. 109287, 1 out. 2019.

FERNANDES, F.; DA SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para a compostagem de bio sólidos**. Rio de Janeiro: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999.

FIALHO, L. L. **Caracterização da matéria orgânica em processo de compostagem por métodos convencionais e espectroscópicos**. São Carlos: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 10 dez. 2007.

FIALHO, L. L. et al. Monitoramento Químico e Físico do Processo de Compostagem de Diferentes Resíduos Orgânicos. 2011.

FUNDAÇÃO SEADE. **Perfil dos Municípios Paulistas - São Carlos**. Disponível em: <<https://perfil.seade.gov.br/>>. Acesso em: 20 mar. 2021.

GREGIO, F. **Cientistas criam sistema de biorreatores de bancada para testes com compostagem**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/39912326/cientistas-criam-sistema-de-biorreatores-de-bancada-para-testes-com-compostagem>>. Acesso em: 7 jan. 2022.

GUERMANDI, J. I. **Avaliação dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos dos fertilizantes orgânicos produzidos pelas técnicas de compostagem e vermicompostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos coletada em estabelecimentos alimentícios de São Carlos/SP**. São Carlos: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 2 out. 2015.

HASSEN, A. et al. Microbial characterization during composting of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v. 80, n. 3, p. 217–225, 1 dez. 2001.

JEONG, Y. K.; KIM, J. S. A new method for conservation of nitrogen in aerobic composting processes. **Bioresource Technology**, v. 79, n. 2, p. 129–133, 1 set. 2001.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Editora Agronômica CERES, 1985.

KIM, V. J. H. **Análise da composição gravimétrica dos resíduos domiciliares de São Carlos (SP)**. São Carlos: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 26 mar. 2019.

LAURA, F. et al. Selecting sustainable sewage sludge reuse options through a systematic assessment framework: Methodology and case study in Latin America. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118389, 1 jan. 2020.

LIANG, C.; DAS, K. C.; MCCLENDON, R. W. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. **Bioresource Technology**, v. 86, n. 2, p. 131–137, 1 jan. 2003.

LIMA, P. D. M. et al. Environmental assessment of existing and alternative options for management of municipal solid waste in Brazil. **Waste Management**, v. 78, p. 857–870, ago. 2018.

LOHRI, C. R. et al. Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products: a review with focus on low- and middle-income settings. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 16, n. 1, p. 81–130, 1 mar. 2017.

MARGALLO, M. et al. Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. **Science of The Total Environment**, v. 689, p. 1255–1275, 1 nov. 2019.

MASSUKADO, L. M. **Sistema de apoio à decisão: avaliação de cenários de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos domiciliares**. [s.l.] Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

MASSUKADO, L. M. **Desenvolvimento do processo de compostagem em unidade descentralizada e proposta de software livre para o gerenciamento municipal dos resíduos sólidos domiciliares**. [s.l.] Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 22 ago. 2008.

MONTEIRO, J. H. P. et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MONTEIRO, R. T. R.; FRIGHETTO, R. T. S. Determinação da umidade, pH e capacidade de retenção de água do solo. In: FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J. (Eds.). . **Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo: manual técnico**. 1. ed. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 198.

PACE, S. A. et al. Impact of organic waste composition on life cycle energy production, global warming and Water use for treatment by anaerobic digestion followed by composting. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 137, p. 126–135, 1 out. 2018.

PENETRA, R. G. et al. Post-treatment of effluents from anaerobic reactor treating domestic sewage by dissolved-air flotation. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 8, p. 137–143, 1 jan. 1999.

SACHS, IGNACY. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond, 2000.

SÃO CARLOS. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de São Carlos**. São Carlos: FIPAI, 2020. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/meio-ambiente/173561-plano-municipal-de-gestao-integrada-de-residuos.html>>.

SCHALCH, V. et al. **Resíduos Sólidos - Conceitos, Gestão e Gerenciamento**. 1. ed. São Paulo: Elsevier Editora Ltda., 2019.

SEMEIA COMPOSTAGEM. **Sobre nós**. Disponível em: <<https://semeiacompostagem.wixsite.com/inicio/sobre>>. Acesso em: 15 mar. 2022.

SENESI, N. Composted materials as organic fertilizers. **The Science of the Total Environment**, v. 81–82, p. 521–542, 1 jun. 1989.

SF ENVIRONMENT. **Mayor Lee Announces San Francisco Reaches 80 Percent Landfill Waste Diversion, Leads All Cities in North America**. Disponível em: <<https://sfenvironment.org/news/press-release/mayor-lee-announces-san-francisco-reaches-80-percent-landfill-waste-diversion-leads-all-cities-in-north-america>>. Acesso em: 5 jan. 2022.

SOARES, A. C. DE M.; BARROS, J. R. M. DE; CARMO, A. J. B. DO. Avaliação e perspectivas do comportamento da demanda de fertilizantes no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 21, n. 1, p. 29–60, 29 abr. 1983.

SOUZA, F. A. DE et al. **Compostagem**. Rio de Janeiro: Embrapa Agrobiologia, 2001.

TUOMELA, M. et al. Biodegradation of lignin in a compost environment: A review. **Bioresource Technology**, v. 72, n. 2, p. 169–183, 1 abr. 2000.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables**. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2017. Disponível em: <[https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017\\_KeyFindings.pdf](https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf)>. Acesso em: 21 maio. 2019

US EPA. **Zero waste case study: San Francisco**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/transforming-waste-tool/zero-waste-case-study-san-francisco>>. Acesso em: 5 jan. 2022.

VALENTE, B. S. et al. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de Zootecnia**, v. 58, n. 224, p. 59–85, 17 set. 2008.

VARGAS-GARCÍA, M. C. et al. Microbial population dynamics and enzyme activities in composting processes with different starting materials. **Waste Management**, v. 30, n. 5, p. 771–778, 1 maio 2010.

VEIGA, J. E. DA. **Desenvolvimento sustentável: desafio do século XXI**. 3. ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

ZAHEDI, S. Energy efficiency: Importance of indigenous microorganisms contained in the municipal solid wastes. **Waste Management**, v. 78, p. 763–769, ago. 2018.

## APÊNDICE A

Este apêndice apresenta o memorial de cálculo para o dimensionamento de uma usina de compostagem por revolvimento windrow, e está dividido em duas partes: a primeira trata da questão das estimativas de geração de resíduos e a segunda parte, especificamente, do dimensionamento das áreas de pátio onde ficam as leiras de compostagem.

### Memorial de Cálculo – Parte 1 – Estimativas de geração de resíduos

Para a estimativa do crescimento populacional foi adotada uma progressão geométrica conforme a equação 1, com a população estimada  $P$  em função do tempo  $t$ , e a constante  $P_0$  a população inicial no ano 2020. A taxa de crescimento médio  $i$ , entre os anos 2010 e 2020, foi calculada através da equação é igual a 1,38 %.

$$P_{(t)} = P_0(1 + i)^{t-t_0} \quad 1$$

$$i = \left(\frac{P_{2020}}{P_{2010}}\right)^{1/10} - 1 \quad 2$$

A geração de resíduos sólidos urbanos – RSU para cada ano foi estimada através da equação 3, sendo o produto da geração diária per capita e a população estimada calculada na equação 1. A geração per capita também varia em função do tempo conforme a equação 4. Para cada ano  $t$ , a taxa de incremento anual da geração per capita  $i_q$  é de 1,0 %.

$$W_{(t)} = q_{(t)}P_{(t)} \quad 3$$

$$q_{(t)} = q_0(1 + i_q)^{t-t_0} \quad 4$$

A constante  $q_0$  é a geração per capita de RSU para o ano de 2018, com uma população estimada em 249.415 habitantes e geração de RSU em 67.872 toneladas, o que

resulta no valor de 272 kg/hab.dia. Relacionando as duas equações 3 e 4, e multiplicando pelo fator de correção 0,365 para transformar a unidade de quilogramas por dia para toneladas por ano, é possível calcular a produção de resíduos sólidos urbanos conforme a equação 5.

$$W_{(t)} = 0,365 q_0(1 + i_q)^{t-t_0} P_{(t)} \quad [\text{ton./ano}] \quad 5$$

A geração per capita de lodo na ETE Monjolinho e dos resíduos de poda e capina também foram calculadas com referência ao ano de 2018, do mesmo modo como foi feito para a geração de RSU. Porém, diferente dos RSU, que apresentaram incremento anual de 1,0 % na geração per capita, para esses dois resíduos foi adotada uma geração per capita constante e variam apenas em função do crescimento populacional – pode ser utilizada a equação com a taxa  $i_q$  igual a zero.

A FORSU - fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos  $f_u$  é fixada em 37,5 % ao longo de todo o período de projeto. Desse modo, a quantidade da fração orgânica dos RSU, denotada por  $W_u$ , é determinada conforme a equação 6.

$$W_u = f_u W_{(t)} \quad 6$$

Para determinar a quantidade anual de resíduos para a compostagem  $W_c$ , soma-se a quantidade de FORSU desviada para a compostagem, o lodo da ETE Monjolinho e os resíduos de poda e capina dos serviços de limpeza urbana. Para o estudo, estes dois últimos são 100 % destinados a compostagem, enquanto que a quantidade de resíduos orgânicos da FORSU é desviada conforme as metas de redução de resíduos destinados ao aterro estabelecidas no PMGIRS de São Carlos, denotada por um fator  $k$ .

$$W_c = k W_u + W_{lodo} + W_{poda} \quad 7$$

## Memorial de Cálculo – Parte 2 – Pátio de compostagem

O dimensionamento do pátio de compostagem é feito a partir da quantidade de resíduos destinados a compostagem  $W_c$ , calculado conforme descrito na parte anterior. Para calcular a quantidade diária  $w$  a ser processada, considerando uma operação de segunda-feira a sábado, divide-se esta quantidade de resíduos pelos dias do ano menos os domingos (um ano tem 52 domingos, portanto, são 313 dias operando por ano), tal como demonstra a equação 8.

$$w = \frac{W_c}{313} \quad 8$$

A densidade do resíduo orgânico  $\rho$  é 0,550 toneladas por metro cúbico (valor determinado em laboratório). Logo, o volume diário  $v$  é dado pela equação 9 a seguir.

$$v = \frac{w}{\rho} \quad 9$$

Considerando uma leira de compostagem de perfil trapezoidal com uma largura da base maior  $B$  e base menor  $b$ , altura  $h$  e comprimento  $L$ , a relação entre área da seção vertical, volume de resíduos e o comprimento é dado pelas equações 10 e 11.

$$A_{seção} = \frac{h(B + b)}{2} \quad 10$$

$$L = \frac{v}{A_{seção}} \quad 11$$

Logo, a área em planta de cada leira  $A_{leira}$  corresponde ao produto do seu comprimento  $L$  e a largura da base maior definida no projeto  $B$  (equação 12). Dessa forma, por simplicidade operacional, cada leira pode ser montada diariamente com a chegada de novos volumes de resíduos, ou seja, cada leira corresponde a geração de um dia operacional de resíduos.

$$A_{leira} = BL$$

12

Para o cálculo da área de compostagem, são duas fases de degradação, uma ativa e outra de maturação, seguidas de um período de armazenagem. Na primeira e segunda fase os resíduos são dispostos em leiras, espaçadas de uma distância suficiente para a passagem das máquinas de revolvimento. Dessa maneira, a área de degradação ativa, primeiros dias de compostagem, é dada pelo produto da área da leira e o período de tempo em degradação ativa  $T_a$ , em dias, multiplicado também por um fator de revolvimento  $k_r$  (representa a área adicional para promover o revolvimento da leira).

$$A_{Degradação} = k_r A_{leira} T_a$$

13

A área de maturação, como foi demonstrado em laboratório, exige pouco revolvimento nos primeiros dias, logo após o abaixamento das temperaturas, e pode até dispensar o revolvimento no último mês dos 120 dias totais de compostagem. Por isso é previsto um fator de revolvimento no dimensionamento dessa área para garantir que os revolvimentos sejam executados. Além disso, considera-se um também um coeficiente de redução de volume de 50 %, após a fase de degradação ativa. O período de tempo de maturação é denotado por  $T_m$ .

$$A_{Maturação} = 0,5 k_r A_{leira} T_m$$

14

O coeficiente de revolvimento  $k_r$  pode ser calculado através da razão entre a faixa, ao lado da leira, necessária para a locomoção do equipamento de revolvimento (denotada pela letra  $a$ ) e a largura da base da leira, definida no projeto. Para o revolvimento por equipamento tracionado, foi adotada uma faixa de 3,0 metros e, para equipamento autopropelido, uma faixa de 1,2 metros (60 centímetros para cada lado da leira).

$$k_r = a/B$$

15

Para concluir o cálculo das três áreas mais importantes, considera-se que o volume ocupado pelo armazenamento é 3 vezes menor se comparado com a maturação e que o período de tempo de armazenamento  $T_z$  é de 30 dias.

$$A_{\text{Armazenamento}} = \frac{1}{3} A_{\text{leira}} T_z \quad 16$$

A soma das áreas de degradação ativa, área de maturação e área de armazenamento representa a área de produção,  $A_{PROD}$ , ou simplesmente área operacional, que pode ser representada conforme a equação 17.

$$A_{PROD} = A_{\text{Degradação}} + A_{\text{Maturação}} + A_{\text{Armazenamento}} \quad 17$$

Além das áreas operacionais destinadas a compostagem e armazenamento, o empreendimento deve incluir ainda uma área complementar para trânsito das máquinas, edifícios de apoio, etc., que, nesse estudo, foi definida em 20 % da área total. Nesses termos, o cálculo final da área total da usina de compostagem é expresso conforme a equação 18 a seguir, onde  $f$  é a porcentagem adicional definida no projeto.

$$A_{\text{Total}} = \frac{A_{\text{VOR}}}{1 - f} \quad 18$$