



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



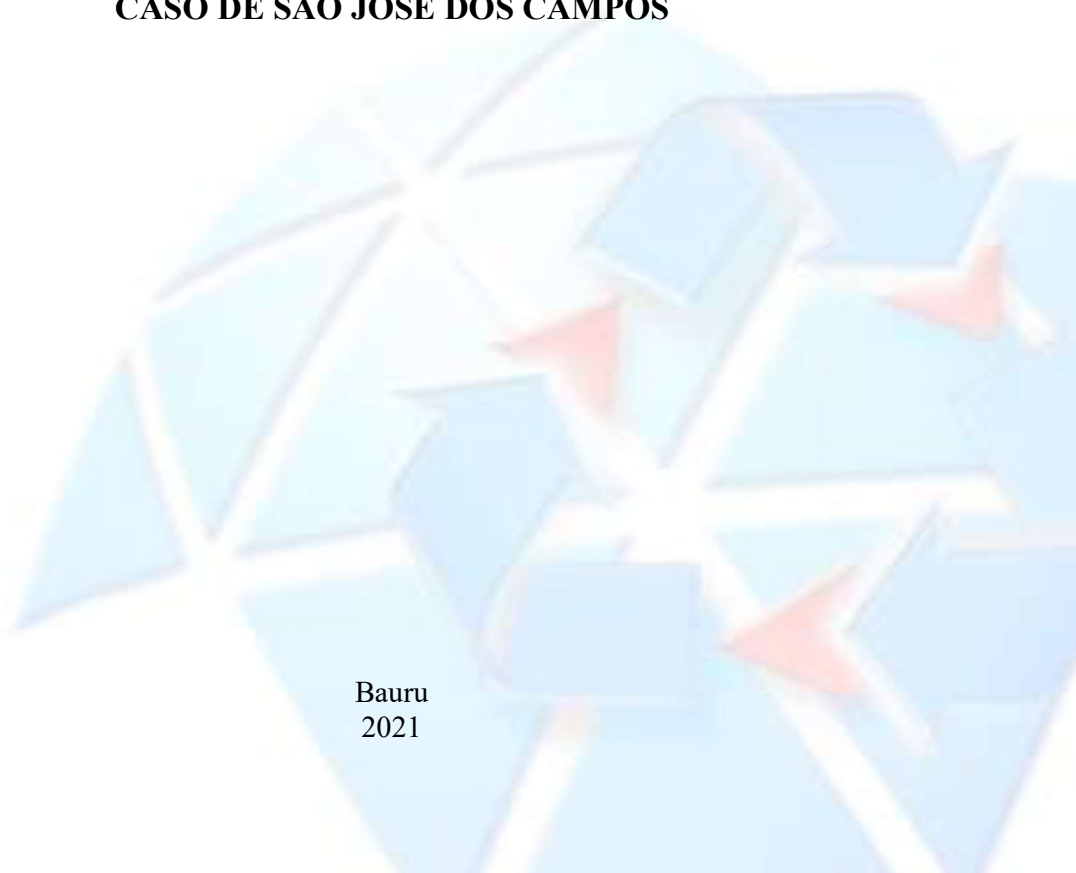
Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

PEDRO LOPES LUCAS DE AMORIM

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
COMPOSTAGEM DESCENTRALIZADA DE FEIRAS:
CASO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS**

Bauru
2021



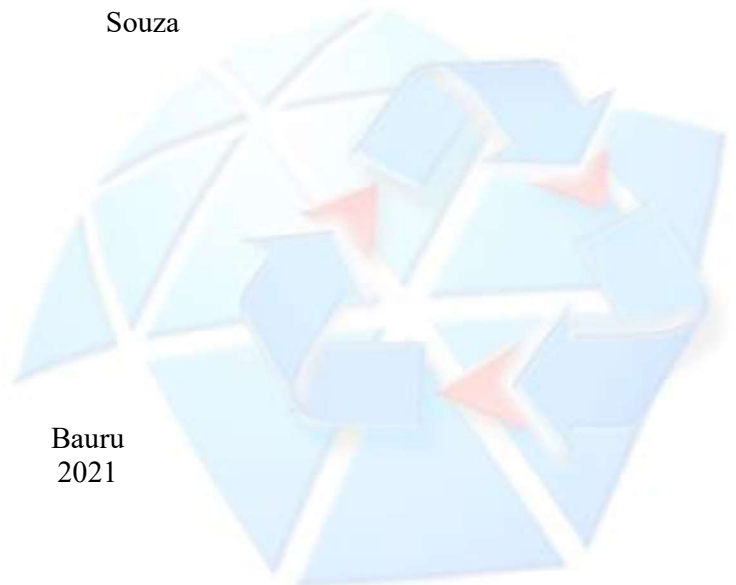
PEDRO LOPES LUCAS DE AMORIM

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA
COMPOSTAGEM DESCENTRALIZADA DE FEIRAS:
CASO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração em Saneamento Ambiental e Linha de Pesquisa em Manejo de Resíduos.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Gabbay de Souza

Bauru
2021



Amorim, Pedro Lopes Lucas de.

Viabilidade técnica e econômica da compostagem descentralizada de resíduos de feiras : Caso de São José dos Campos / Pedro Lopes Lucas de Amorim, 2021
81 f. : il.

Orientador: Ricardo Gabbay de Souza

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021

1. Resíduos urbanos. 2. Resíduos orgânicos. 3. Compostagem descentralizada. 4. Feiras urbanas. 5. Avaliação de desempenho. 6. Viabilidade econômica. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PEDRO LOPES LUCAS DE AMORIM, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 dias do mês de agosto do ano de 2021, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PEDRO LOPES LUCAS DE AMORIM, intitulada **Viabilidade de sistema de compostagem descentralizada em São José dos Campos/SP**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de São José dos Campos - UNESP, Prof. Dr. RAPHAEL TOBIAS DE VASCONCELOS BARROS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental / UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Prof. Dr. GERMANO GÜTTLER (Participação Virtual) do(a) Agronomia / Universidade do Estado de Santa Catarina. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: _____ **APROVADO** _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO: **PEDRO LOPES LUCAS DE AMORIM**

DE: "VIABILIDADE DE SISTEMA DE COMPOSTAGEM DESCENTRALIZADA EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS/SP"

PARA:

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA COMPOSTAGEM DESCENTRALIZADA DE RESÍDUOS DE FEIRAS: CASO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Bauru, 04 de agosto de 2021.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Ricardo Gabbay De Souza", enclosed within a large, loopy oval shape.

Prof. Dr. Ricardo Gabbay De Souza
Orientador

Resumo

A fração orgânica representa uma porção significativa dos resíduos sólidos urbanos, e no Brasil a maioria desta é destinada para aterros. O uso de alternativas para tratamento como a compostagem pode fornecer benefícios ambientais, visto que valorizam o uso dos resíduos orgânicos para aplicações como a adubação do solo. A compostagem pode ser feita em diversas escalas, e, quando feita de maneira descentralizada, fornece um tratamento mais simples e próximo das fontes geradoras. Dentre as aplicações da compostagem descentralizada, as feiras urbanas representam uma fonte de resíduos que em geral contém elevada quantia de resíduos orgânicos e poucas impurezas, porém ainda é escassa a quantidade de estudos que abordam a viabilidade de seu tratamento, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Esta dissertação propõe analisar a viabilidade técnica e econômica da implantação de um modelo de compostagem de baixo custo em escala piloto para tratamento descentralizado de resíduos orgânicos de feiras urbanas no município de São José dos Campos, Brasil. Através da montagem e monitoramento do piloto foi observado que mesmo o modelo na configuração mais simples proposta possui potencial para tratamento destes resíduos, pois produziu compostos com parâmetros adequados de relação C/N final e coliformes termotolerantes, transformando a massa de resíduos inicial para aproximadamente 1/3 de composto dentro de um período de 2 meses. Pela análise econômica, concluiu-se que para a viabilidade dos cenários propostos é necessária compatibilização de alguns recursos já existentes. Porém, nas situações com menos requisitos a compostagem descentralizada pode ser mais interessante do que a manutenção da destinação para aterro, podendo arrecadar entre R\$ 284,11 e R\$ 41.492,01 até o fim do período considerado, enquanto que com a manutenção do aterramento haveria apenas despesas.

Palavras-chave: resíduos urbanos, resíduos orgânicos, compostagem descentralizada, feiras urbanas, aeração passiva, inoculante biológico, avaliação de desempenho, viabilidade econômica.

Abstract

The organic fraction represents a significant portion of urban solid waste, and in Brazil most of this is destined to landfills. The use of treatment alternatives such as composting provide environmental benefits, as they value the use of organic waste for applications such as soil fertilization. Composting can be done at different scales, and when done in a decentralized way can provide a simpler treatment closer to the generating sources. Among the applications of decentralized composting, street markets represent a source of waste that generally contains a high amount of organic waste and few impurities, but the number of studies that address the feasibility of its treatment is still scarce, both from a technical and an economic point of view. This dissertation proposes to analyze the technical and economic feasibility of implementing a pilot-scale low-cost composting model for decentralized treatment of organic waste from street markets in the city of São José dos Campos, Brazil. The assembly and monitoring of the pilot, concluded that even the model in the simplest configuration proposed has potential to treat these wastes, as it produced composts with adequate parameters of final C/N ratio and thermotolerant coliforms, transforming the initial waste mass to approximately 1/3 of compost within a 2 month period. The economic analysis concluded that for the viability of the proposed scenarios it is necessary to share some existing resources. However, in situations with fewer requirements, decentralized composting can be more interesting than maintaining the destination to landfill, which can collect between R\$ 284,11 and R\$ 41.492,01 by the end of the period considered, while with landfill there would be only expenses.

Keywords: urban waste, organic waste, decentralized composting, street markets, passive aeration, biological inoculant, performance evaluation, economic viability.

Índice de Figuras

Figura 1 – Exemplo de produtos alimentícios comercializados na feira da Vila Ema.....	7
Figura 2 – Caracterização gravimétrica da feira da Vila Ema na ETRS pela URBAM.....	8
Figura 3 – Esquema de aeração passiva nas composteiras montadas no estudo. Foram testadas configurações sem tubos, com tubo central apenas (a), e com tubos auxiliares além do tubo central (b).....	10
Figura 4 – Espaço no Parque da Cidade utilizado para o projeto de compostagem.....	12
Figura 5 – Contêineres para coleta manual dos resíduos orgânicos e registros da diversidade de resíduos coletados.....	13
Figura 6 – Termômetros adaptados com hastes para medição da temperatura nas composteiras.	14
Figura 7 – Fluxograma da análise estatística utilizada.	16
Figura 8 – Comparação da aparência da mistura inicial (13/11/2020) e do composto final (14/01/2021).	19
Figura 9 – Comparação dos perfis de temperatura entre tratamentos na 1ª rodada.....	21
Figura 10 – Comparação dos perfis de temperatura entre tratamentos na 2ª rodada.....	22
Figura 11 – Comparativo entre a divisão do município por regiões (esq.) e por setores (dir.) (PMSJC, 2017).	34
Figura 12 – Localização das 9 feiras que geram menos de 1.440 L de RSU por semana, e dos Parques Urbanos (com raio de 1 km).....	38
Figura 13 – Localização das 22 feiras que geram até 2880 L de RSU por semana	39
Figura 14 – Cenários analisados para as diferentes situações de despesas e receitas	41
Figura 15 – Alimentação das composteiras até estabilização do composto final.....	44
Figura 16 – Representação da área ocupada por um componto com 10 composteiras	45

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Características dos tratamentos das rodadas de compostagem realizadas.....	11
Tabela 2 – Balanço de massa nas composteiras.	18
Tabela 3 – Relação C/N conforme o tempo (em dias) de compostagem.	23
Tabela 4 – População e geração per capita dos resíduos da coleta comum (URBAM, 2018b).....	33
Tabela 5 – Detalhamento das feiras consideradas no cenário 2FC	45
Tabela 6 – Detalhamento das feiras consideradas no cenário 9FC	46
Tabela 7 – Detalhamento das feiras consideradas no cenário 22FC	47
Tabela 8 – Pesos (t/ano) e emissões de GEE (tCO ₂ e/ano) do aterro e da compostagem em cada cenário proposto.	48
Tabela 9 – Deslocamento evitado na coleta comum (km/mês) devido à implantação da compostagem em cada cenário.	48
Tabela 10 – Deslocamentos (km/ano) e emissões (tCO ₂ e/ano) da coleta comum e da compostagem para cada cenário.	49
Tabela 11 – Emissões de GEE (tCO ₂ e/ano) de cada cenário proposto.....	49
Tabela 12 – Despesas com equipamentos por componto (EQP_{fixos})	51
Tabela 13 – Despesas com paletes para montagem das composteiras (PLT).	51
Tabela 14 – Despesas com equipamentos que podem ser compartilhados entre compontos (EQP_{part})	52
Tabela 15 – Despesas com o veículo da coleta segregada nas feiras (VUC).	52
Tabela 16 – Despesas com infraestrutura (IE).....	53
Tabela 17 – Despesas mensais de produção por componto (PROD)	53
Tabela 18 – Despesas com análises laboratoriais para controle de qualidade da compostagem (LAB).	54
Tabela 19 – Despesas mensais com equipamentos de proteção individual (EPI).....	55
Tabela 20 – Receitas com custos evitados nas operações de aterro (At) e coleta comum (CC) dos RSU.....	55
Tabela 21 – Resumo das despesas e receitas para o cenário 2FC	56
Tabela 22 – Resumo das despesas e receitas para o cenário 9FC	56
Tabela 23 – Resumo das despesas e receitas para o cenário 22FC	57
Tabela 24 – Custos de instalação e operação para cada cenário em cada situação	57

Tabela 25 – Tempo de retorno (em anos) de cada cenário em cada situação.....	58
Tabela 26 – Potencial de arrecadação em cada cenário viável no período de interesse.....	60
Tabela 27 - Custo de destinação hipotético dos resíduos urbanos (R\$/t) para viabilizar a proposta de compostagem em cada situação de cada cenário	61

Sumário

RESUMO.....	V
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	2
2.1 OBJETIVO GERAL.....	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
3 PRIMEIRO ARTIGO.....	4
3.1 INTRODUÇÃO.....	4
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
3.2.1 Caracterização da área de estudo.....	5
3.2.2 Caracterização dos resíduos gerados nas feiras livres.....	6
3.2.3 Seleção do método de compostagem.....	8
3.2.4 Coleta dos resíduos e montagem do piloto.....	11
3.2.5 Monitoramento dos parâmetros operacionais.....	14
3.2.6 Análise estatística dos dados.....	15
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
3.3.1 Gravimetria e relação C/N inicial.....	16
3.3.2 Balanço de massa e aparência do composto final.....	17
3.3.3 Temperatura nas composteiras.....	20
3.3.4 Relação C/N final.....	23
3.3.5 Coliformes termotolerantes.....	24
3.4 CONCLUSÕES.....	25
4 SEGUNDO ARTIGO.....	26
4.1 INTRODUÇÃO.....	26
4.2 METODOLOGIA.....	29
4.2.1 Caracterização do município de estudo.....	29
4.2.2 Dimensionamento da unidade de compostagem.....	30
4.2.3 Coleta de dados para estimativa dos impactos ambientais.....	31
4.2.4 Coleta de dados para estimativa de custos de instalação dos componentes.....	35
4.2.5 Coleta de dados para estimativa de custos de operação dos componentes.....	36
4.2.6 Descrição e análise econômica dos cenários propostos.....	37
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.3.1 Dimensionamento do componente.....	43
4.3.2 Dados dos cenários.....	45

4.3.3	<i>Estimativa dos impactos ambientais com emissões</i>	48
4.3.4	<i>Viabilidade econômica dos cenários</i>	51
4.3.5	<i>Tempo de retorno para cada cenário</i>	58
5	CONCLUSÕES	62
6	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

No Brasil é estimada a geração total de 79,0 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, sendo 45,3% destes resíduos orgânicos, como os restos de alimentos domésticos, por exemplo. O destino mais comum para os resíduos orgânicos urbanos é o aterramento, porém há alternativas ambientalmente mais sustentáveis, como a compostagem, que buscam reinserir os resíduos orgânicos como matéria prima para novas finalidades (ABRELPE, 2020).

O processo de compostagem consiste na decomposição dos resíduos orgânicos em formas mais simples pela ação de microrganismos em condições aeróbias, gerando como produto principal um material sólido chamado de composto orgânico, que pode ser utilizado para adubação do solo e demais produtos agrícolas (SMA, 2014). A compostagem pode ser feita em uma variedade de técnicas e escalas, sendo uma das alternativas os sistemas de compostagem descentralizada, que focam no tratamento dos resíduos orgânicos próximo à fonte geradora, e nos centros urbanos pode ser aplicada em escolas, restaurantes, feiras, entre outros (Siqueira, 2014; Pai *et al.*, 2019; Lu *et al.*, 2020).

Apesar de haver diversos focos de pesquisa na literatura sobre compostagem, ainda é incipiente a quantidade de publicações que abordam o potencial da compostagem descentralizada para tratamento dos resíduos orgânicos de fontes como as feiras urbanas (Brito, 2008; Nord, 2012; Souza *et al.*, 2019; Galvão, 2019). Outro ponto ainda pouco explorado é a viabilidade econômica desses sistemas de compostagem descentralizada, sendo informação relevante para prover referências dos requisitos, custos e benefícios desse tipo de alternativa (Fehr, 2009; Bortolotti *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2020).

Dentro das possibilidades de aplicação da compostagem descentralizada, as feiras urbanas representam uma fonte de resíduos que em geral contém elevada quantidade de resíduos orgânicos e poucas impurezas (Brito, 2008; Nord, 2012; Galvão, 2019; Souza *et al.*, 2019). Os estudos que consideram o aspecto econômico da compostagem de resíduos de feira ainda são escassos, havendo uma lacuna de referências com foco em demonstrar a viabilidade econômica da instalação e operação desses sistemas, sobretudo na literatura nacional (Yenneti & Gamaralalage, 2012; Lim *et al.*, 2019; Leow *et al.*, 2020; Slomski *et al.*, 2020).

Assim, a dissertação foi estruturada na forma de 2 artigos, sendo que o primeiro teve como foco a montagem e avaliação do desempenho (viabilidade técnica) de um

modelo de compostagem de baixo custo proposto para as feiras urbanas, e o segundo a análise da viabilidade econômica de implantação desse modelo em cenários contemplando diferentes quantidades de resíduos orgânicos de feiras no município.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Esta dissertação teve como objetivo geral analisar a viabilidade técnica e econômica de implantação de um modelo de compostagem descentralizada para os resíduos orgânicos das feiras urbanas no município de São José dos Campos/SP.

2.2 Objetivos Específicos

O primeiro artigo possui os seguintes objetivos específicos:

- Obter informações sobre a geração e a composição das feiras na área de estudo;
- Montar unidades de compostagem em escala piloto pelo modelo selecionado de baixo custo, testando diferentes condições de compostagem pela variação de parâmetros como aeração passiva, microrganismos atuantes e quantidade de material estruturante;
- Monitorar os parâmetros de qualidade do processo e dos produtos finais;
- Comparar o desempenho das diferentes condições de compostagem testadas;
- Indicar quais condições testadas possuem viabilidade de aplicação para as feiras.

O segundo artigo possui os seguintes objetivos específicos:

- Estimar os impactos ambientais da destinação convencional dos resíduos sólidos urbanos no município de estudo, e os impactos ambientais considerando a destinação em cenários que incluam a implantação de unidades de compostagem de baixo custo;

- Estimar os custos de instalação e operação desses cenários considerando diferentes níveis de requisitos;
- Avaliar o tempo de retorno para que cada cenário seja economicamente viável dentro do período de interesse.
- Indicar quais cenários possuem viabilidade econômica e quais os investimentos e benefícios que estes podem gerar em comparação com a manutenção da destinação convencional em aterro.

3 PRIMEIRO ARTIGO

Título: Avaliação de compostagem descentralizada de baixo custo para resíduos orgânicos de feiras urbanas.

Revista submetida: Ambiente & Sociedade (working paper)

Autores: Pedro Lopes Lucas de Amorim, Ricardo Gabbay de Souza e Ingrid Jale da Silva Sales

Citação: Amorim et al. (2021).

3.1 INTRODUÇÃO

Segundo estudo realizado em 2019, no Brasil é estimada a geração total de 79,0 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo 45,3% destes resíduos orgânicos, como os restos de alimentos domésticos, por exemplo. O destino mais comum para os resíduos orgânicos urbanos é o aterramento, porém há alternativas ambientalmente mais sustentáveis, como a compostagem, que buscam reinserir os resíduos orgânicos como matéria prima para novas finalidades (ABRELPE, 2020).

O processo de compostagem consiste na decomposição dos resíduos orgânicos em formas mais simples pela ação de microrganismos em condições aeróbias, gerando como produto principal um material sólido chamado de composto orgânico, que pode ser utilizado para adubação do solo e demais produtos agrícolas (SMA, 2014). A compostagem pode ser feita em uma variedade de técnicas e escalas, sendo uma das alternativas os sistemas de compostagem descentralizada, que focam no tratamento dos resíduos orgânicos próximo à fonte geradora, e nos centros urbanos pode ser aplicada em escolas, restaurantes, feiras, entre outros (Siqueira, 2014; Pai *et al.*, 2019).

Há uma série de fatores que podem influenciar no sucesso de um projeto de compostagem, incluindo: aeração e microrganismos eficazes. A aeração adequada é fundamental para evitar a decomposição lenta dos resíduos e a geração de odores desagradáveis. Uma das formas de prover a aeração de forma passiva é através do uso de tubulações, que favorecem o fluxo de ar dentro das unidades de compostagem (Kuroda & Matsumoto, 2006; Ogunwande & Osunade, 2011). Em relação aos microrganismos que atuam no processo, apesar dos resíduos que compõem a mistura inicial normalmente já

apresentarem microrganismos suficientes para o desenvolvimento da compostagem, tem sido crescente o número de pesquisas sobre o potencial de aceleração da decomposição através do uso de inoculantes contendo microrganismos específicos (Nair & Okamitsu, 2010; Nord, 2012).

Apesar de haver diversos focos de pesquisa na literatura sobre compostagem, ainda é incipiente a quantidade de publicações que abordam o potencial da compostagem descentralizada para tratamento dos resíduos orgânicos de fontes como as feiras urbanas (Brito, 2008; Nord, 2012; Souza *et al.*, 2019; Galvão, 2019). O presente estudo propôs um modelo de compostagem de baixo custo para feiras urbanas, em escala piloto, testando diferentes condições de aeração passiva e o uso de um inoculante biológico comercial. Espera-se que, com a avaliação do desempenho e da adequação do modelo aos parâmetros de qualidade, este possa ser aplicado como uma alternativa à destinação praticada de aterro no município de estudo.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia geral da pesquisa consistiu nas seguintes etapas, detalhadas a seguir: caracterização da área de estudo, caracterização dos resíduos gerados nas feiras livres, seleção do método de compostagem, coleta dos resíduos e montagem do piloto, e o monitoramento dos parâmetros operacionais.

3.2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo foi São José dos Campos/SP, localizado na região Sudeste do Brasil, com população de 729.737 habitantes (IBGE, 2021). O município dispõe de aterro municipal próprio que recebe diariamente 686 t de RSU, dos quais aproximadamente 320 t são resíduos orgânicos. O município dispõe ainda de usina de triagem que recebe os resíduos recicláveis da coleta seletiva (plásticos, metais, vidros, papéis). Tanto o aterro quanto a central de triagem estão localizadas na Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos (ETRS), gerida pela empresa pública de serviços de gestão de RSU Urbanizadora Municipal (URBAM). Para os resíduos orgânicos, até a época do presente estudo, não

havia ações implantadas por parte do poder público para destinação mais sustentável destes resíduos.

3.2.2 Caracterização dos resíduos gerados nas feiras livres

A seleção da feira geradora dos resíduos orgânicos coletados para o trabalho utilizou um levantamento de 2019 da URBAM que estimou a geração de resíduos em 34 das 40 feiras que ocorrem no município. Pelo levantamento, no município há 13 feiras que geram até 1440 litros/semana, 14 feiras que geram entre 1440 e 2880 litros/semana, e 7 feiras que geram acima de 2880 litros/semana. A definição destas faixas tem relação com a capacidade de tratamento prevista para a unidade de compostagem selecionada neste estudo (Seção 3.3.1).

A partir das estimativas do volume de resíduos gerados a feira selecionada como referência para a coleta de dados no trabalho ocorre no bairro da Vila Ema (> 2880 litros/semana). A feira da Vila Ema se localiza na região central do município (coordenadas geográficas de referência: 23°12'12"S; 45°53'40"W), ocorre toda sexta-feira das 07:00 às 14:00, se estendendo por cerca de 430 m, com comércio de frutas, legumes, carnes, alimentos processados e bancas de venda de produtos não alimentícios (brinquedos, acessórios, panelas, etc) (Figura 1).



Figura 1 – Exemplo de produtos alimentícios comercializados na feira da Vila Ema.

A caracterização gravimétrica para os resíduos da feira da Vila Ema segregou os resíduos orgânicos em frações com potencial distinção de decomposição na compostagem (devido às diferenças de umidade, composição, etc). Por exemplo, a fração de “Hortaliças” apresenta folhas e talos de verduras que em geral possuem fina espessura e rápida decomposição. Outro exemplo, a fração de “Carnes” contém sobras do processo de limpeza de peixes e frangos, resíduos de origem animal, destoando dos demais resíduos observados, sendo resíduos de mais lenta decomposição e com maior potencial de atração de vetores. Há também as frações de cítricos (laranja, abacaxi, limão), cascas (bagaço de cana, casca mandioca) e alimentos processados (frituras).

A equipe da URBAM conduziu a caracterização gravimétrica em julho/2019, com acompanhamento do autor principal deste trabalho (Figura 2). O procedimento adotou a coleta isolada dos resíduos totais da feira da Vila Ema em caminhão, sem realizar compactação e sem haver mistura com resíduos de outras fontes. A URBAM transportou os resíduos até outra área para aferição do peso total destes. Em seguida despejou os resíduos em um pátio, para amostragem de 240 litros para a gravimetria, tendo como base o método de quarteamento recomendado pela NBR 10.007/2004 e a ASTM D5231-92 sobre a massa mínima a ser coletada, obtendo uma noção das quantidades de recicláveis, rejeitos e orgânicos produzidos semanalmente na feira da Vila Ema (ABNT, 2004; ASTM,

2008). A gravimetria também possibilitou a montagem de amostra com as mesmas porcentagens das frações separadas de resíduos orgânicos, para análise dos teores de carbono e nitrogênio, visando determinar a proporção necessária de fontes de nutrientes (resíduos das feiras) e material estruturante (folhas e galhos) na alimentação das composteiras. Foi ainda determinado o peso específico *in natura* dos resíduos orgânicos, a partir da média de repetidas pesagens da amostra misturada dentro de um recipiente de volume conhecido.



Figura 2 – Caracterização gravimétrica da feira da Vila Ema na ETRS pela URBAM.

3.2.3 Seleção do método de compostagem

Para a compostagem havia o interesse de escolha de um modelo funcional, de pequena escala, baixo custo e simples operação, de modo que a facilidade de implantação fosse um atrativo tanto para o poder público quanto para quaisquer interessados em praticar a compostagem. O modelo escolhido é semelhante às pilhas estáticas de aeração passiva (Ferreira *et al.*, 2005; Ogunwande & Osunade, 2011; Lima Junior *et al.*, 2017), construído como uma estrutura compacta de caixa de 1000 L (1,0 x 1,0 x 1,0 m), dificultando assim o acesso de animais ao material em decomposição. A estrutura das caixas consiste de 5 paletes de madeira amarrados com arame, e forrada internamente no piso e nas laterais com sombrite, para permitir a passagem de ar ao mesmo tempo em que contém os resíduos dentro da estrutura. O modelo possui aberturas laterais entre as ripas de madeira dos paletes, e fica a 15 cm elevado do piso, o que favorece o fluxo de ar pelo composto tanto pela base quanto pelas laterais.

O projeto piloto de compostagem utilizou 6 composteiras de paletes como teste, em replicatas, diferentes condições de compostagem (Figura 3). Como havia o foco em realizar uma compostagem de baixo custo e fácil operação, além do uso de materiais de fácil obtenção para a estrutura da composteira, optou-se por não triturar os resíduos e também não utilizar sistema de aeração ativa ou revolvimento manual do composto, evitando a necessidade de compra de equipamentos, consumo de energia e de esforço excessivo do operador durante o processo de compostagem. Para evitar a formação de zonas anaeróbias dentro das composteiras, buscou-se favorecer a aeração passiva no experimento, sendo que, além das frestas dos paletes e da elevação entre a base da composteira e o piso, em algumas unidades foram incluídos tubos de PVC de 100 mm de diâmetro, perfurados (4 furos de 1 cm, diametralmente opostos, espaçados a cada 7,5 cm de altura), para verificar se contribuiriam para uma melhor distribuição do ar que flui da base para o interior (Kuroda & Matsumoto, 2006; Ogunwande & Osunade, 2011). A marcação a cada 10 cm de altura feita a partir da base em cada tubo central auxiliou na verificação da redução da altura do material durante o processo de compostagem.

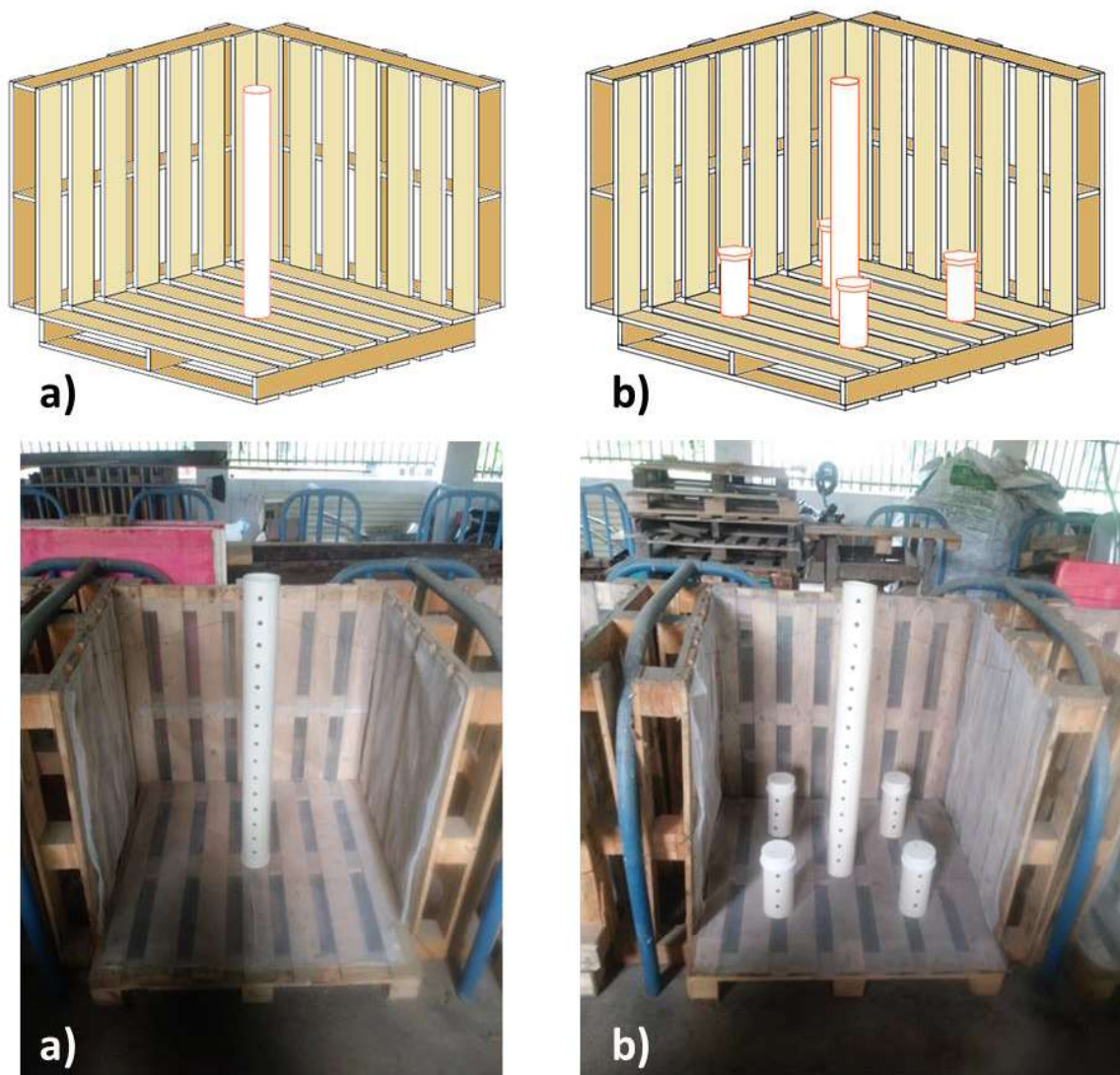


Figura 3 – Esquema de aeração passiva nas composteiras montadas no estudo. Foram testadas configurações sem tubos, com tubo central apenas (a), e com tubos auxiliares além do tubo central (b).

Além das opções de aeração passiva, o experimento testou a influência da adição de um inoculante biológico comercial no desempenho do modelo proposto, sendo realizado em 2 rodadas, devido aos resultados obtidos na primeira tentativa, com a Tabela 1 apresentando as condições testadas.

Tabela 1 – Características dos tratamentos das rodadas de compostagem realizadas.

	1ª Rodada	2ª Rodada
Data coleta/ montagem	04/10/2020	13/11/2020
Tempo de compostagem	100 dias	60 dias
Condições testadas	3 condições, em duplicatas	3 condições, sem réplicas
Tratamentos testados	C1 e C2: aeração central + inoculador biológico	C2: aeração central + inoculante biológico
	C3 e C4: aeração central apenas	C4: aeração central apenas
	C5 e C6: aeração central + tubos auxiliares extras	C6: sem tubos
Proporção volumétrica material estruturante / resíduos da feira	2/1, em camadas alternadas de 15 cm de altura	1/1, sem camadas internas de estruturante, apenas na base e cobertura
Resíduos coletados na feira	Tomate, laranja, maçã, bagaço de cana, palha de milho, casca de cebola e de alho, e predominantemente alface, couve e broto de bambu	Alface, couve, tomate, pêssgo, bagaço de cana, broto de bambu, casca de cebola e de alho, e predominantemente palha de milho, espiga de milho e abacaxi

3.2.4 Coleta dos resíduos e montagem do piloto

O Parque da Cidade Roberto Burle Marx possui um espaço gerido pela Prefeitura de São José dos Campos que contém um galpão com área coberta, escolhido para a montagem do piloto de compostagem. O local já vinha sendo utilizado desde 2016 para o desenvolvimento de iniciativas de compostagem com fins educacionais, não sendo destinado propriamente para o foco de tratamento de resíduos urbanos, que é competência primária da URBAM. O espaço não é licenciado pelo órgão ambiental estadual (CETESB) para operar como uma unidade de compostagem de resíduos, porém, há legislação estadual que permite que para a pequena quantidade de resíduos processados no local (menor que

500 kg/d) ocorra dispensa de licenciamento ambiental (SIMA, 2020). O galpão é coberto, possui piso concretado, água e energia elétrica, boa aeração devido ao cercamento com grades e segurança para evitar acesso de pessoal não autorizado (Figura 4).



Figura 4 – Espaço no Parque da Cidade utilizado para o projeto de compostagem.

Por estar dentro do Parque Municipal, há disponibilidade de folhas e podas em abundância para serem utilizadas como material estruturante no processo de compostagem. Uma amostra deste material também foi coletada para determinação de parâmetros de carbono e nitrogênio, visando definir a proporção entre resíduo de feira e material estruturante na alimentação das composteiras.

A coleta dos resíduos orgânicos na feira da Vila Ema para obtenção dos materiais para compostagem aconteceu a partir do empréstimo de 9 contêineres de 240 L que a URBAM utiliza normalmente nos serviços de varrição. A coleta foi feita de forma segregada e manual pelo autor durante a feira, com objetivo de coletar a maior quantidade possível de orgânicos variados por banca e evitando coleta de recicláveis e rejeitos. O experimento utilizou materiais como alface, couve, tomate, laranja, maçã, abacaxi, bagaço de cana, broto de bambu, palha e espiga de milho, casca de cebola e de alho. Não coletou materiais como cascas de coco (difícil decomposição, principalmente sem prévia trituração) e carnes (tempo de degradação elevado, maior potencial de atração de animais e maior potencial de produção de odores indesejáveis) (Figura 5). Ao final da feira e antes da varrição pelos funcionários da URBAM, há pessoas que possuem o hábito de recolher uma parte significativa dos resíduos orgânicos para usar na alimentação de animais em suas propriedades (valorização animal), apesar desta prática não ser regulamentada pelas autoridades sanitárias. Os moradores das residências das ruas nas quais a feira ocorre

costumam dispor seus resíduos domiciliares para aproveitar a coleta, de modo que potencialmente essa ação mistura rejeitos (como lixo de banheiro) aos recicláveis e orgânicos atualmente já coletados misturados pela URBAM.



Figura 5 – Contêineres para coleta manual dos resíduos orgânicos e registros da diversidade de resíduos coletados.

A Prefeitura transportou os contêineres para a área da Central de Compostagem do Parque Municipal. Como o conteúdo de cada contêiner possuía uma mistura de orgânicos, ocorreu a divisão do volume de cada contêiner por 6 para alimentação homogênea das composteiras, visando menor influência da composição na análise estatística dos parâmetros operacionais.

Na 1ª rodada do experimento a alimentação das composteiras ocorreu em camadas alternadas de aproximadamente 15 cm de altura de orgânicos da feira, cobertas por camadas de mesmo volume em material estruturante. Devido aos resultados da 1ª rodada, na 2ª rodada a base e cobertura das composteiras tinham material estruturante. O formato escolhido de batelada para a alimentação objetivou que não houvesse novos incrementos de material ao longo do monitoramento do processo. O estudo estimou a quantidade de material introduzido nas composteiras através de recipientes de volume pré-determinado, pesado com uma balança manual antes de sua adição nas composteiras. Ao final da montagem, cada composteira atingiu a marca aproximada de 65 cm de altura, computando cerca de 650 litros por unidade.

Após a montagem das composteiras o monitoramento teve seu início, com o tempo de compostagem esperado de até 3 meses. Ao fim do processo ocorreu a abertura das composteiras, a aferição do volume final de composto na leitura do tubo central, pesagem da massa de composto para balanço, feito registros fotográficos das características visuais

do composto, e coleta das amostras para controle de qualidade, buscando verificar a possibilidade de destinar o composto para uso nas áreas verdes do Parque Municipal (Seção 3.2.5).

3.2.5 Monitoramento dos parâmetros operacionais

Os parâmetros monitorados durante o processo de compostagem foram: altura do material nas composteiras, temperatura nas composteiras, relação C/N e presença de coliformes termotolerantes nos compostos finais. Para todas as análises que dependeram de coleta de amostras do composto essas amostras foram trituradas até obterem granulometria inferior a 5 mm (MAPA, 2017).

Para a temperatura, o estudo utilizou termômetros digitais comerciais, com faixa de medição entre 0 e 100 °C, fixados em hastes metálicas para auxiliar no posicionamento dos sensores a aproximadamente 25 cm acima da base das composteiras (Figura 6). As leituras diárias aconteceram com 6 repetições por composteira para permitir melhor análise da variabilidade das medidas e comparar se os tratamentos eram estatisticamente distintos.



Figura 6 – Termômetros adaptados com hastes para medição da temperatura nas composteiras.

O estudo também coletou amostras de aproximadamente 10 g de cada composto para determinação da relação C/N, dos teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio

total Kjeldahl (NTK) (MAPA, 2017). Devido a limitação de recursos, essas análises aconteceram apenas para 2 períodos, sendo um nos compostos finais e o outro 30 dias antes. Também realizou a coleta de 200 g do composto final para avaliar a presença de coliformes termotolerantes através do método da membrana filtrante (APHA, 2017).

Os valores admitidos dos parâmetros analisados no trabalho para avaliar a qualidade do composto final foram:

- Coliformes termotolerantes: máximo de 1000 NMP/g (MAPA, 2006);
- Relação C/N final: menor que 20/1 (MAPA, 2009);
- Temperatura: maior que 55 °C por 14 dias, ou 65 °C por 3 dias (SIMA, 2020).

3.2.6 *Análise estatística dos dados*

Devido às limitações de recursos, apenas para o parâmetro de temperatura foram realizadas medições em quantidades adequadas para tratamento estatístico. O projeto utilizou réplicas para verificar o efeito de variáveis aleatórias não monitoradas, como diferenças de insolação, vento, entre outros. As análises entre as réplicas de cada tratamento ocorrem com o intuito de verificar se havia interferência significativa do erro experimental e das variáveis aleatórias. Em sequência realizaram-se análises entre os diferentes tratamentos, para verificar se havia distinção em relação às condições de compostagem testadas (Minitab, 2020).

Para essas comparações, em cada dia monitorado foram utilizados dois testes, selecionados em função das premissas estatísticas a serem atendidas pelos conjuntos de leituras diárias de temperatura: normalidade e homoscedasticidade (homogeneidade de variância). Caso um conjunto de dados apresentasse normalidade e homoscedasticidade, a comparação da semelhança entre os dados de tal conjunto deveria ser analisada pelo método paramétrico ANOVA de um fator. Caso o conjunto de dados não atenda a pelo menos uma dessas premissas, deve ser utilizado o método não-paramétrico de Kruskal-Wallis (Ayres *et al.*, 2007; Razali & Wah, 2011).

O estudo adotou o teste de Shapiro-Wilk para a normalidade (por se ter menos de 50 leituras diárias por composteira), realizado no *software* BioEstat (Ayres *et al.*, 2007). Para homoscedasticidade foi utilizado o teste de Bartlett, pelo procedimento descrito por McNeese (2009). Para o teste de Kruskal-Wallis foi utilizado o *software* BioEstat, adotando nível de significância “ α ” de 5%, e para ANOVA a ferramenta inata do *software*

Excel, considerando o mesmo nível de significância. Para os casos em que o teste de Kruskal-Wallis indicou haver diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos, foi ainda utilizado o teste *post-hoc* de Dunn no BioEstat para identificar entre quais pares comparados havia essa diferença. De forma semelhante, para ANOVA foi aplicado o teste *post-hoc* de Tukey no *software* Excel (Figura 7).

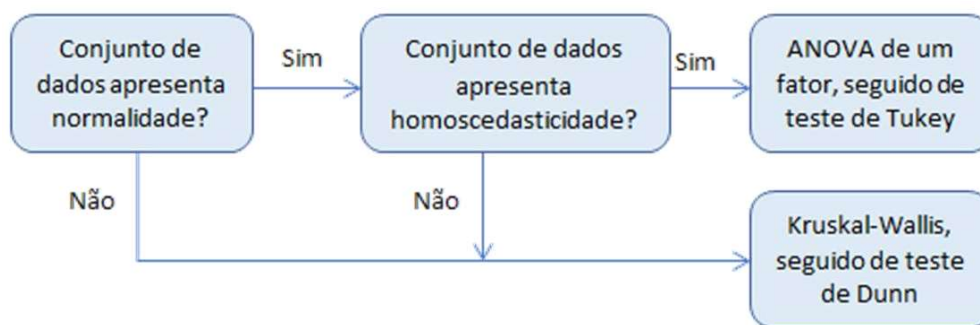


Figura 7 – Fluxograma da análise estatística utilizada.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Gravimetria e relação C/N inicial

Em face de não encontrar referências sobre a geração de resíduos de feiras para o município de estudo, a gravimetria realizada pode contribuir para a gestão municipal de resíduos, na medida em que gera dados locais para utilização pelos gestores públicos e demais interessados. Da gravimetria realizada para a feira da Vila Ema, em 28/06/2019 coletaram 1.640 kg de resíduos na feira, sendo 1.295 kg (79,0%) resíduos orgânicos, 247 kg (15,1%) recicláveis e 97 kg (5,9%) rejeitos. Na literatura nacional há poucos estudos gravimétricos de feiras, mas para comparação, a caracterização gravimétrica dos RSU em uma feira de um município no Nordeste do Brasil indicou que esta gerava em média menos que 2000 kg e que 84,2% destes eram resíduos orgânicos (Vaz *et al.*, 2003).

Para a amostra de resíduos montada a partir do detalhamento da gravimetria, o peso específico *in natura* foi de 197 kg/m³, e o resultado da análise da relação C/N inicial foi de 28/1 (teor de 29,17% para COT, 1,05% para NTK e umidade de 61,1%), indicando que o material inicial já se aproximava da faixa sugerida na literatura para o início do processo

de compostagem (30/1) mesmo sem a adição de material estruturante. Em trabalhos semelhantes, Lima Junior *et al.* (2017) obtiveram relação C/N inicial de 26/1 para resíduos já misturados de restos de alimentos de restaurantes (33,3% do volume), grama e folhas secas (66,66%), enquanto outros (Guermandi, 2015; Silva, 2016) obtiveram relação inicial C/N de 12,4/1 para restos de alimento de restaurantes. Isto demonstra a heterogeneidade na composição dos resíduos passíveis de compostagem, sendo que para relações mais baixas há maior necessidade da mistura com materiais estruturantes para a adequação da relação C/N no início do processo.

A estimativa do peso específico *in natura* do material estruturante para permitir a aeração e atuar como material de base e cobertura nas composteiras foi de 26 kg/m³, com COT de 26,65%, NTK de 0,63% e C/N inicial de 42/1 (Seção 3.2.4). O cálculo da proporção teórica de material estruturante/resíduos de feira utilizada como referência para a montagem das composteiras para se obter relação C/N inicial da mistura em 30/1, foi de 1/1 em volume (ou 1/10 em massa) para ocupar volume esperado de 850 L dentro da composteira.

O levantamento da URBAM pela quantidade de contêineres (Seção 3.2.2) estimou um volume da feira da Vila Ema de 6000 litros (25 contêineres de 240 litros), resultando em um peso específico de 273 kg/m³. Os 1.640 kg da gravimetria contabilizaram, além do peso dos orgânicos, o peso de recicláveis e rejeitos. Dessa forma, uma feira que gera 1.440 litros/semana (394 kg) terá 311 kg de resíduos orgânicos, sendo 178 kg passíveis de utilização no piloto de compostagem (sem coleta de cocos ou carnes). Pelo balanço de massa do piloto, esses 178 kg ocupariam o volume de 900 litros, que se aproxima da capacidade de tratamento prevista para uma composteira de paletes.

3.3.2 Balanço de massa e aparência do composto final

Na montagem das rodadas, o preenchimento do volume das composteiras foi inferior ao estimado nos cálculos teóricos, devido a compactação sofrida pelos materiais durante sua adição. Com as quantias de resíduos coletadas (conforme Seção 3.2.4), a distribuição entre as composteiras atingiu altura máxima de 65 cm da base, gerando um volume ocioso, visto que as composteiras teriam capacidade para preenchimento até próximo de 90 cm. Em relação ao balanço entre as quantidades de resíduos alimentadas e as de composto obtido, todas as composteiras demonstraram redução entre 56,3 e 67,9% do

volume inicial (em massa entre 72,0 e 81,1%), estando de acordo com resultados da literatura de redução para aproximadamente 1/3 do volume inicial de resíduos (Tabela 2) (Inácio & Miller, 2009; Guermandi, 2015; Slomski et al., 2020). Houve maior redução na 2ª rodada do que na 1ª, o que se acredita que possa ser atribuído ao fato de na 2ª rodada não ser adicionado material estruturante entre as camadas de orgânicos.

Tabela 2 – Balanço de massa nas composteiras.

	1ª rodada				2ª rodada			
	C1	C3	C5	Média	C2	C4	C6	Média
H_o (cm)	65	65	65	-	65	65	65	-
H_f (cm)	29	26	32	-	21	22	19	-
%Red (v)	59,7	62,5	56,3	59,5	63,2	67,9	63,2	64,8
%Red (m)	72,0	76,0	76,9	75,0	81,1	78,0	79,0	79,4

Obs.: H_o = altura inicial, H_f = altura final, %Red (v) = redução em relação ao volume inicial, %Red (m) = redução em massa.

Em relação ao aspecto visual observado, devido à falta de trituração e revolvimento no método proposto, o material de cobertura e das paredes nos compostos finais se apresentou bastante íntegro ao final de ambas as rodadas, sendo facilmente distinguido do material interno, que apresentou as características esperadas para o produto da compostagem (material de cor escura, textura terrosa e homogênea), como é possível observar na Figura 8. O composto da 2ª rodada apresentava mais homogeneidade do que na 1ª, provavelmente por não ter sido incluído material estruturante entre as camadas de orgânicos na 2ª rodada.



Figura 8 – Comparação da aparência da mistura inicial (13/11/2020) e do composto final (14/01/2021).

Ao final de ambas as rodadas não foi possível distinguir pedaços de frutos ou hortaliças, que compunham a maior parte dos resíduos na mistura inicial, mesmo tendo sido adicionados pedaços grosseiros como cortes de abacaxi e melancia, ocorrendo completa degradação. Ainda foi possível identificar pedaços de cana de açúcar e de palha e sabugo de milho, materiais mais recalcitrantes que, apesar de apresentarem certo grau de degradação, apresentaram necessidade de recirculação como material estruturante em uma batelada seguinte para completar sua compostagem. Guermandi (2015) observou que as composteiras com resíduos triturados apresentaram compostos mais homogêneos e escuros que nas condições sem trituração. No primeiro caso, com 5 semanas de compostagem já não se distinguiram mais pedaços de alimentos, e no segundo caso apenas após a 13ª semana. A trituração é uma etapa adicional que pode contribuir para obtenção de um composto mais homogêneo, mas como no presente estudo um dos objetivos era verificar a viabilidade da técnica com menos esforço, etapas e custo, a trituração não foi contemplada.

É interessante destacar também que, para todas as composteiras, o processo inteiro ocorreu sem a observação de geração de lixiviado, odores ou atração de vetores. O monitoramento feito por Brito (2008) para leiras de compostagem de resíduos orgânicos de feiras com dimensões semelhantes, porém a céu aberto, observou que nos primeiros 5 dias de compostagem houve geração de odores desagradáveis e atração de moscas, e que após a 4ª semana os compostos apresentavam coloração mais escura, indicativa de produtos humificados (maturação). As caixas de paletes do modelo de composteira adotado no presente estudo podem ter contribuído para mitigação desses contratempos, pois nelas o

composto fica contido em uma estrutura que fica menos exposta a vetores do que as leiras, e que auxilia a aeração não apenas pela base como também pelas laterais, evitando a produção de maus odores de regiões anaeróbias no material.

3.3.3 *Temperatura nas composteiras*

Na comparação das temperaturas da 1ª rodada entre as duplicatas de um mesmo tratamento, a análise estatística indicou que, em uma minoria de dias monitorados, houve diferenças entre as réplicas, predominando os desempenhos semelhantes dentro do mesmo tratamento. O estudo considerou as medições pouco sujeitas à interferência de variáveis não monitoradas (como diferenças de insolação e vento). A literatura não apresenta um consenso para o método de análises estatísticas. Não é usual a prática do uso de réplicas para verificar efeito de variáveis não monitoradas. Mesmo trabalhos que usam métodos afins não expressam a checagem das premissas de normalidade e homoscedasticidade (Ogunwande & Osunade, 2011; Zhou et al., 2014; Silva, 2016).

O gráfico da Figura 9 indica maior variação das leituras no início do processo. Com a análise estatística estas variações não foram significativas. Como visualmente não há diferenças muito acentuadas e que perdurem por períodos maiores (perfis de temperatura muito semelhantes), possivelmente essas diferenças são mais relacionadas à amostragem de pontos heterogêneos dentro do composto (ex.: os sensores alcançarem pontos com maior atividade de decomposição em relação aos demais medidos na data), do que relacionadas propriamente aos parâmetros de aeração e do inoculante biológico que estavam sendo comparados nos tratamentos das composteiras. Essa heterogeneidade dos pontos de medição colaborou para um maior desvio padrão das temperaturas nas repetições, o que influenciou principalmente a comparação dos dados iniciais nos testes estatísticos.

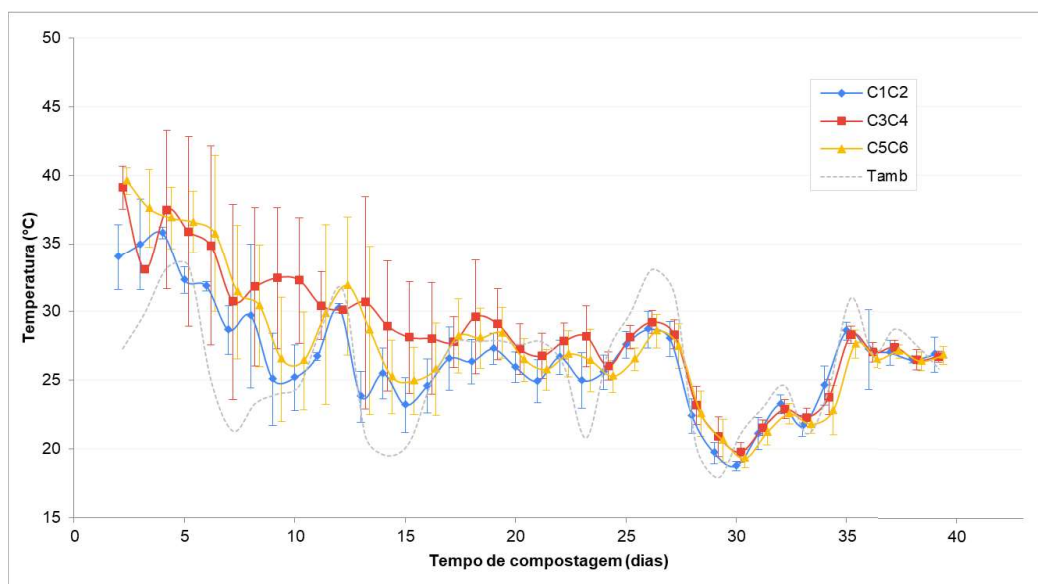


Figura 9 – Comparação dos perfis de temperatura entre tratamentos na 1ª rodada.

De forma geral, houve rápida queda da temperatura em ambas as rodadas. Supõe-se que os resíduos utilizados eram preferencialmente de alimentos de rápida degradação (hortaliças e frutos) e que os resíduos mais recalcitrantes (como palha/sabugo de milho e bagaço de cana) também tiveram atuação como materiais estruturantes. Apesar de colaborar para maior aeração, isto gerou porosidade excessiva e influenciou na menor retenção de calor nas composteiras. Um estudo com modelo de composteira semelhante observou que, com o aumento da aeração passiva, a temperatura nas pilhas estáticas caía mais rapidamente (Kuroda & Matsumoto, 2006). Na compostagem de resíduos de feira em leiras de pequena escala, com dimensões semelhantes às deste estudo, Brito (2008) também observou rápida queda da temperatura, atingindo a temperatura ambiente entre 20 e 25 dias após início do processo, supondo que um dos motivos seja que as leiras de tamanho reduzido possuem área superficial proporcionalmente maior que leiras tradicionais, com maior exposição ao ambiente, favorecendo a perda de calor.

A análise estatística da 1ª rodada mostra que a comparação entre tratamentos também não teve diferenças significativas pronunciadas. Pelos perfis de temperatura as composteiras com tubo central e inoculante biológico (C1/C2) tiveram queda mais rápida, seguidas das que tiveram tubo central e tubos auxiliares (C5/C6), e as que tinham apenas o tubo central (C3/C4) mantiveram temperaturas ligeiramente superiores por mais tempo (Figura 9).

A comparação dos tratamentos da 2ª rodada também não aparentou diferenças pronunciadas. A análise estatística indicou que havia poucos dias com diferenças significativas, comportamento semelhante à 1ª rodada. Apesar de não ocorrerem nos mesmos períodos, foi possível observar que a 2ª rodada apresentou temperaturas ligeiramente maiores do que a 1ª rodada (Figura 10). O fato de não ter sido utilizado material estruturante entre as camadas de orgânicos na 2ª rodada pode ter contribuído para manutenção de temperatura por mais tempo. Visto que pelos demais parâmetros há indicação de que os resíduos sofreram decomposição de forma satisfatória, haveria maior possibilidade de uso do espaço útil das composteiras com adição de resíduos da feira, demandando menor uso de material estruturante, como também já indicado pela relação C/N inicial discutida no tópico anterior.

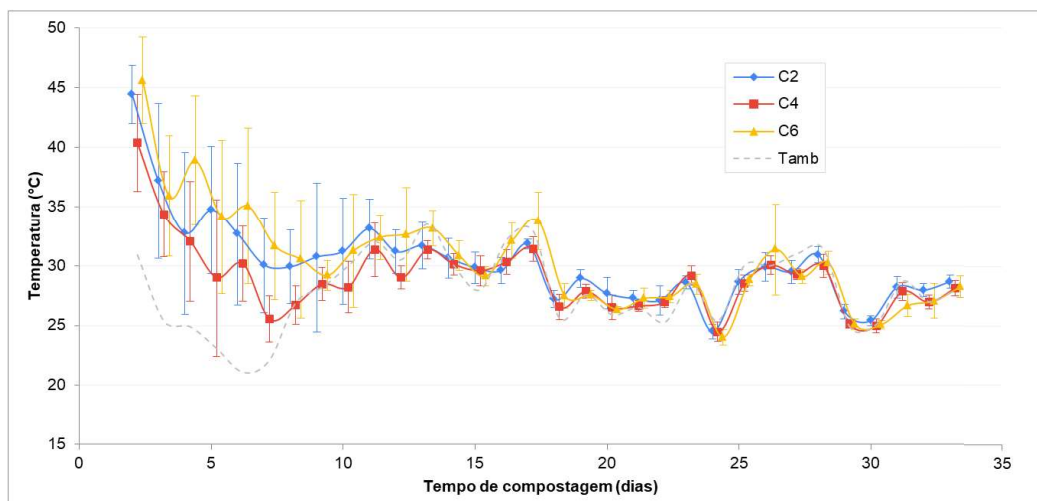


Figura 10 – Comparação dos perfis de temperatura entre tratamentos na 2ª rodada.

As temperaturas máximas registradas na 1ª rodada foram de 37,3 °C para C1/C2, 42,9 °C para C3/C4, e 40,9 °C para C5/C6. Para a 2ª rodada, foram de 47,2 °C para C2, 45,2 °C para C4 e 49,5 °C para C6. Conforme constatado também por Lima Junior *et al.* (2017), a composteira montada sem tubos (C6) apresentou maior pico de temperatura, sendo atribuído na referência que a ausência do efeito de chaminé favoreceu a manutenção do calor.

Pelos registros, apesar de ter havido atividade biológica nas composteiras, não foi possível identificar temperaturas na faixa teórica da fase termofílica (temperaturas acima de 55 °C), importante para obter indicação de eliminação de patógenos e ervas daninhas (Cekmecelioglu *et al.*, 2005; MAPA, 2006; Wichuk & McCartney, 2007; Inácio & Miller,

2009). Experimentos semelhantes (Ogunwande & Osunade, 2011; Guermandi, 2015) registraram temperaturas superiores, mas diferentemente do presente estudo utilizaram camadas de pó de serragem na cobertura e laterais das composteiras para reduzir a perda de umidade e conservar o calor. Faverial e Sierra (2014) e Vásquez *et al.* (2015) estudaram sistemas de compostagem descentralizada em escala doméstica e comunitária e constataram ser usual, nestes casos, a temperatura do processo permanecer apenas alguns graus acima da temperatura ambiente (entre 20 e 40 °C), raramente atingindo temperaturas termofílicas, principalmente na compostagem doméstica.

Apesar de contribuir para evitar a formação de regiões anaeróbias, o foco na aeração no modelo de compostagem utilizado pode ter prejudicado a capacidade de retenção de calor nas composteiras, sendo interessante testar o desempenho de configurações que utilizem materiais mais finos para a cobertura, uma vez que não é uma medida que discorde do objetivo de desenvolver uma compostagem viável de baixo custo. Outro ponto observado é que temperaturas mais elevadas podem ter sido atingidas, mas não sendo registradas no monitoramento, devido ao procedimento adotado de 6 medidas em apenas 1 momento do dia, ao invés da medição contínua com equipamentos adequados.

3.3.4 Relação C/N final

Pelo parâmetro da relação C/N final, observamos que os compostos de todos os tratamentos realizados se adequaram à faixa exigida pela norma (C/N menor que 20/1), obtendo o valor de 17,1/1 para C1; 18,2/1 para C2; 17,3/1 para C3; 19,4/1 para C4; 18,2/1 para C5; e 18,5/1 para C6 (Tabela 3).

Tabela 3 – Relação C/N conforme o tempo (em dias) de compostagem.

1ª Rodada	70 dias	100 dias	2ª Rodada	30 dias	60 dias
C1	19,6	17,1	C2	21,7	18,2
C3	19,6	17,3	C4	25,1	19,4
C5	19,8	18,2	C6	22,3	18,5

Em ambas as rodadas os tratamentos que utilizaram o inoculante biológico comercial (C1 e C2) apresentaram relação C/N finais ligeiramente menores que as demais em suas respectivas rodadas. As composteiras da 1ª rodada apresentaram valores finais

menores que as da 2ª rodada, provavelmente devido ao maior tempo de condução da compostagem, o que permite maior maturação do composto. Em ambas as rodadas com cerca de 2 meses os compostos amostrados indicam estabilidade adequada para aplicação no solo.

Vásquez *et al.* (2015) reportaram que a relação C/N final de diversos sistemas de compostagem descentralizada doméstica e comunitária usualmente permanece na faixa entre 10/1 e 15/1 após 4 meses de monitoramento do processo, observando valores até 18/1 para o composto considerado estabilizado e humificado. Um estudo de compostagem descentralizada com modelo de composteira semelhante ao aqui utilizado obteve relação C/N final menor que 20/1 também dentro de 2 meses de compostagem (Lima Junior *et al.*, 2017). Estes resultados do parâmetro C/N para 2 meses de monitoramento se assemelham aos do presente estudo.

3.3.5 Coliformes termotolerantes

Os resultados de coliformes no composto final foram de 240 NMP/g para C1, 15 NMP/g para C2, 212 NMP/g para C3, 28 NMP/g para C4, 28 NMP/g para C5 e menor que 3 NMP/g para C6. Os resultados de coliformes ficaram abaixo de 1000 NMP/g, indicando que os compostos estariam sanitizados, mesmo não registrando patamares de temperaturas mantidos por pelo menos 55 °C por 14 dias (MAPA, 2006). Uma explicação para esse resultado pode ser a realização presencial da coleta seletiva dos resíduos na feira pelo autor principal, reduzindo a presença de contaminantes no material da alimentação do processo.

Por fim, pela comparação dos tratamentos testados, todos apresentaram resultados semelhantes dentro dos valores adequados para o parâmetro da relação C/N relativa à bioestabilização do composto, e de coliformes termotolerantes como referência para o controle de patógenos. Uma vez que não houve distinções acentuadas entre os tratamentos, isso indica que mesmo o tratamento mais simples (C6 da 2ª rodada), que não utilizou tubos para aeração, inoculante biológico e camadas de material estruturante no interior da mistura (utilizou apenas na cobertura e base) tem potencial para ser uma alternativa tecnicamente viável de compostagem dos resíduos orgânicos de feiras, sem demandar grande esforço, com uso de materiais de baixo custo, podendo gerar menos impactos ambientais negativos que a destinação em aterro sanitário.

3.4 CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou o desempenho de um modelo de baixo custo de compostagem semelhante ao de pilhas estáticas, para tratamento de resíduos de uma feira livre, testando diferentes condições de aeração passiva e o uso de um inoculante biológico comercial.

A gravimetria forneceu uma estimativa da geração da feira (1640 kg/semana) e de suas frações (79,0% orgânicos, 15,1% recicláveis e 5,9% rejeitos). Isto contribuiu para a geração de dados locais para a gestão de resíduos no município de São José dos Campos/SP.

Ao longo do processo houve mudanças nas características dos materiais coletados, com a maioria dos alimentos sendo efetivamente biodegradada, sem problemas com geração de lixiviado, odores ou atração de vetores. Em todas as composteiras houve uma redução para cerca de 1/3 do volume inicialmente disposto, sem demandar esforços com revolvimento ou trituração durante os períodos de 2 meses de compostagem. Portanto, esta pode ser uma alternativa simples para a reciclagem dos resíduos putrescíveis das feiras, com restos de poda/capina de parques municipais e limpeza urbana.

Visto que todos os tratamentos testados apresentaram desempenho satisfatório, mesmo o modelo mais simples (C6 da 2ª rodada: sem tubos, sem inoculante biológico, com material estruturante apenas na cobertura e base) é adequado para tratamento da fração mais facilmente biodegradável dos resíduos de feiras, apresentando uma alternativa mais sustentável para destinação desses resíduos.

4 SEGUNDO ARTIGO

Título: Viabilidade econômica de compostagem descentralizada de baixo custo para resíduos orgânicos de feiras urbanas.

Revista ainda não selecionada.

Autores: Pedro Lopes Lucas de Amorim e Ricardo Gabbay de Souza

Citação: Amorim & Souza (2021).

4.1 INTRODUÇÃO

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são provenientes das atividades domésticas e de limpeza urbana (Brasil, 2010). Em 2019 foram gerados mais de 79 Mt de RSU no Brasil, sendo 59,5% destes destinados aos aterros sanitários, 23% aos aterros controlados e 17,5% aos lixões. Os resíduos orgânicos correspondem a maior parcela de RSU no país (45,3%), seguidos por 35% de plásticos, 14,1% de rejeitos e 5,6% de resíduos têxteis, couros, borrachas e outros resíduos (ABRELPE, 2020).

A principal destinação dos RSU no Brasil são os aterros por suas características permitirem o recebimento de orgânicos, recicláveis e rejeitos, e oferecerem um menor custo por tonelada (SMA, 2014). Devido à vida útil e aos impactos ambientais potenciais da disposição final em aterros, é crescente a quantidade de estudos indicando a necessidade de implantar destinações mais sustentáveis, tanto do ponto de vista ambiental quanto do econômico (Blair *et al.*, 2014; Gomes *et al.*, 2015; Liikanen *et al.*, 2018; Paes *et al.*, 2020). Alguns dos focos dos estudos econômicos sobre a melhoria na gestão dos resíduos orgânicos urbanos têm sido a redução dos custos dos impactos ambientais negativos, comparação de métodos tradicionais e alternativos de destinação de resíduos, otimização de processos de destinação, e a viabilidade econômica de sistemas propostos (Jensen *et al.*, 2016; Falahi & Avami, 2020; Lu *et al.*, 2020; Paes *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2020).

Um estudo que comparou a destinação em nível nacional na União Européia e Canadá indicou que uma mudança de aterramento para compostagem descentralizada poderia colaborar para a redução em 40% das emissões (Adhikari *et al.*, 2010). Na comparação da ecoeficiência de diferentes cenários, Paes *et al.* (2020) avaliaram a mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em relação à necessidade de investimentos na gestão de resíduos em municípios no Brasil. Concluíram que, em nível nacional, uma mudança nos sistemas de destinação que propiciasse 70% de compostagem dos resíduos orgânicos e 70% de reciclagem dos resíduos secos seria o cenário com

maiores benefícios ambientais em relação à necessidade de investimentos, com uma redução nas emissões de GEE ao custo de elevar em US\$ 11,80 (32%) a tonelada de resíduos destinada. Falahi e Avami (2020) realizaram uma análise de ciclo de vida (ACV) para o sistema de gestão de resíduos de Teerã, indicando que o cenário que combinava o máximo de benefícios ambientais com tecnologias dentro do limite financeiro da cidade era o que previa a implantação de sistemas de compostagem e a separação dos resíduos na fonte.

Além dos aspectos econômicos de instalação e operação das alternativas de destinação, diversos estudos incorporam na análise econômica os impactos do aspecto ambiental, seja adotando como referência as emissões GEE ou então ACV mais complexas, que contemplam um maior número de impactos ambientais (Grosso et al., 2012; Liu et al., 2017; Padmi et al., 2018; Tonini et al., 2020).

Yenneti e Gamaralalage (2012) analisaram a comercialização de créditos de carbono dentro de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) como forma de financiar projetos de compostagem descentralizada na Ásia. Eles observaram que, apesar da compostagem evitar emissões de GEE em relação ao aterramento, há custos de transação envolvidos para comercializar os créditos de carbono sobre essas emissões (custos com pesquisa de mercado, certificação da redução de emissões, etc). Em projetos com maior escala, que evitam mais emissões, esses custos de transação são reduzidos, enquanto em projetos de menor escala os custos de transação podem superar as receitas da comercialização dos créditos de carbono. Como exemplo, consideraram uma receita de 10,00 £/tCO₂e para a comercialização dos créditos de carbono de emissões evitadas e estimaram que um projeto que reduzia 100.000 tCO₂e/ano teria um custo de transação de 0,25 £/tCO₂e, enquanto um projeto que reduzia apenas 100 tCO₂e/ano teria um custo de transação de 176 £/tCO₂e, podendo diminuir a atratividade do projeto.

A análise econômica é um dos fatores cruciais na tomada de decisão nos sistemas de gestão de resíduos, pois o custo elevado de algumas tecnologias pode ter grande impacto no orçamento dos municípios ou inviabilizar a solução. Alguns artigos focaram na viabilidade econômica de sistemas alternativos, como é o caso da compostagem para resíduos orgânicos (Chen, 2016; Sabki *et al.*, 2018; Lu *et al.*, 2020; Keng *et al.*, 2020).

A compostagem pode ser realizada por uma variedade de métodos, sendo que nos sistemas de compostagem descentralizada o tratamento dos resíduos orgânicos é feito em uma maior quantidade de unidades, mais próximas às fontes geradoras, geralmente com

maior envolvimento da comunidade, escalas menores e menores impactos ambientais do que as soluções de usinas de compostagem e aterros. Exemplos de aplicações possíveis para este sistema nos centros urbanos são as escolas, restaurantes, feiras livres, hotéis, entre outros (Siqueira, 2014; Pai *et al.*, 2019). A abordagem da compostagem descentralizada (como a compostagem doméstica e a comunitária) tem sido um foco importante para prover referências locais dos requisitos, custos e benefícios desse tipo de alternativa (Fehr, 2009; Bortolotti *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2020).

Em estudo de compostagem comunitária na Malásia, Leow *et al.* (2019) analisaram a viabilidade econômica de um sistema já implantado que atendia a 100 habitantes, tratando 12,13 t/ano de resíduos orgânicos. Relatam que o sistema teve custo de instalação de MYR 40.500 (R\$ 37.800), custo de operação de 14.410 MYR/ano (13.450 R\$/ano) e receita com a venda de composto em 8.700 MYR/ano, mas concluem que não havia viabilidade econômica, pois os custos de operação eram maiores que as receitas. No estudo os autores propõem ainda um cenário em que a capacidade da compostagem seria ampliada para atender 3.000 habitantes (compostando 584 t/ano), situação na qual o sistema passaria a ser viável, gerando um excedente de 249.178 MYR/ano, que paga a instalação em 3,09 anos. É importante destacar que o valor de venda do composto utilizado no estudo (equivalente a 934 R\$/t) era muito superior ao praticado no Brasil (em torno de 125 R\$/t, conforme Slomski *et al.*, 2020).

Lim *et al.* (2019) analisaram a viabilidade econômica de um sistema de compostagem comunitária de resíduos orgânicos de feiras, hotéis e outras fontes na Malásia, concluindo que apenas com o retorno da venda de composto e economia de aterro não era possível quitar os custos de instalação. Para viabilizar a proposta, consideraram a integração do tratamento dos resíduos orgânicos com um sistema de produção agrícola comunitária, utilizando o composto produzido para cultivo de hortaliças, cuja venda inteirava as receitas que suportavam a sustentabilidade econômica do sistema. Yenneti e Gamaralalage (2012) analisaram o potencial da comercialização de créditos de carbono para financiar projetos de compostagem descentralizada na Ásia, constatando que em sistemas de maior escala o valor arrecadado com os créditos de carbono pode superar os custos de transação envolvidos, sendo uma fonte de receita viável.

Dentro das possibilidades de aplicação da compostagem descentralizada, as feiras urbanas representam uma fonte de resíduos que em geral contêm elevada quantia de resíduos orgânicos e poucas impurezas (Brito, 2008; Nord, 2012; Galvão, 2019; Souza *et*

al., 2019). Os estudos que consideram o aspecto econômico da compostagem de resíduos de feira ainda são escassos, havendo uma lacuna de referências com foco em demonstrar a viabilidade econômica da instalação e operação desses sistemas, sobretudo na literatura nacional (Yenneti & Gamaralalage, 2012; Lim *et al.*, 2019; Leow *et al.*, 2020; Slomski *et al.*, 2020).

O presente trabalho tem o objetivo de analisar a viabilidade econômica da implantação de um modelo de compostagem descentralizada como tratamento alternativo dos resíduos de feiras livres no município brasileiro de São José dos Campos/SP, partindo dos dados locais de desempenho obtidos em Amorim *et al.* (2021) para um modelo de compostagem de baixo custo no município de estudo. Os objetivos específicos são: estimar os impactos ambientais da coleta e destinação convencional de resíduos orgânicos no município de estudo e considerando a destinação em cenários que incluam a implantação de unidades de compostagem de baixo custo; estimar os custos de instalação e operação desses cenários considerando diferentes níveis de requisitos (“situações”, Seção 4.2.6); avaliar o tempo de retorno para que cada cenário seja economicamente viável dentro do período de interesse.

4.2 METODOLOGIA

A metodologia geral da pesquisa consistiu nas seguintes etapas, detalhadas a seguir: caracterização do município de estudo; dimensionamento da unidade de compostagem; coleta de dados para estimativa dos impactos ambientais e dos custos de instalação e operação dos locais de compostagem; e descrição e análise econômica dos cenários propostos.

4.2.1 Caracterização do município de estudo

O município de São José dos Campos está localizado na região sudeste do Brasil, no Estado de São Paulo, possui uma população estimada em 729.737 habitantes e gera aproximadamente 686 t/dia de RSU (IBGE, 2020; PMSJC, 2021). A empresa Urbanizadora Municipal (URBAM) é a responsável pela coleta e destinação desses resíduos para a Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos (ETRS), onde estão

localizados o aterro sanitário municipal (destinação de RSU misturados da coleta comum e de rejeitos) e a Central de Triagem da coleta seletiva (para resíduos recicláveis). Dessa quantidade de RSU gerados no município, 46,65% são referentes aos resíduos orgânicos, ou seja, são coletadas mais de 320 t/d de diversas fontes, sendo uma destas as feiras livres (URBAM, 2018b).

Em São José dos Campos ocorrem semanalmente 40 feiras livres, distribuídas por todas as regiões do município (PMSJC, 2020). As feiras geram grandes quantidades de resíduos orgânicos com pouca contaminação por rejeitos (geração entre 480 e 6000 L/semana, sendo em peso 79,0% resíduos orgânicos, 15,1% recicláveis e 5,9% rejeitos) (Amorim *et al.*, 2021). Apesar disto facilitar o tratamento por alternativas como a compostagem, até a época deste estudo (junho/2021) a destinação destes resíduos continuava sendo o aterro sanitário municipal, sem triagem ou aproveitamento.

4.2.2 Dimensionamento da unidade de compostagem

Para estimar os impactos econômicos e ambientais, cada unidade de compostagem (“composto”, McLeod *et al.*, 1997, Kinuthia, 2005) proposta trataria no máximo 500 kg por dia de resíduos orgânicos. Assim, dispensariam a obtenção de licenciamento ambiental pelo órgão ambiental estadual por se enquadrar como atividade de baixo impacto, simplificando sua instalação e operação (SIMA, 2020).

Para o tratamento contínuo dos resíduos orgânicos das feiras ao longo do ano, o dimensionamento de cada composto considerou o modelo de composteira de baixo custo utilizado em Amorim *et al.* (2021), com as seguintes premissas:

- Cada composteira receberia até 900 L/semana de resíduos orgânicos, que é a capacidade de 1 composteira de paletes utilizada em Amorim *et al.* (2021);
- O tempo mínimo de 2 meses (8 semanas) para a bioestabilização do composto, observado no monitoramento do piloto;
- A área ocupada de 1 m² por composteira e mais 1,5 m ao redor do conjunto de composteiras para retirada de composto, instalação de canaletas de drenagem e deslocamento de equipamentos;
- A geração estimada de resíduos orgânicos das feiras pelo levantamento da URBAM, gravimetria da feira da Vila Ema e balanço de massa de Amorim *et al.* (2021) (Seção 4.3.2);

4.2.3 Coleta de dados para estimativa dos impactos ambientais

A estimativa do impacto que cada alternativa de gestão municipal de resíduos causa ao meio ambiente foi representada pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE). O cálculo dessas emissões ocorreu através da metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) para a destinação por disposição final em aterro sanitário e por compostagem (IPCC, 2006; UNFCCC, 2015). As formas de destinação contabilizaram o aterro dos resíduos da coleta comum e a compostagem proposta para os resíduos de feira. As emissões geradas pela destinação em aterro (GEE_{aterro} , em tCO_2e/ano) foram calculadas conforme a Equação 1.

$$GEE_{aterro} = \varphi \cdot (1 - f) \cdot GWP_{CH_4} \cdot (1 - OX) \cdot \frac{16}{12} \cdot F \cdot DOC_f \cdot MCF \cdot DOC \cdot W_{CC} \quad (1)$$

na qual φ é um fator de correção para considerar as incertezas do modelo; f é a fração de metano (CH_4) que é capturada no aterro e evitada de ser lançada na atmosfera; GWP_{CH_4} é o potencial de aquecimento global do metano, adotado como 21 vezes maior que o potencial da referência que é o gás carbônico (CO_2); OX é o fator de oxidação, que indica a quantidade de metano que é oxidada no material de cobertura dos resíduos no aterro, sendo adotado como 0,1 para aterros com manejo da cobertura dos resíduos; F é a fração volumétrica de metano no biogás do aterro, sendo adotado o padrão de 50%; DOC_f é a fração de carbono orgânico biodegradável que se decompõem sobre as condições do aterro, sendo adotado o valor padrão de 0,5; MCF é o fator de correção do metano, adotado como 1,0 devido ao fato do manejo do aterro incluir a compactação e a cobertura de resíduos; DOC é o carbono orgânico degradável da fração de resíduos considerada, sendo para os resíduos orgânicos de descarte alimentos adotado o valor de 15%; e W_{CC} o peso (em t/ano) dos resíduos orgânicos coletados pela coleta comum (CC) e destinados para aterro em cada cenário (IPCC, 2006; UNFCCC, 2015; Lim *et al.*, 2019).

Para o parâmetro de porcentagem de captura de biogás no aterro sanitário, apesar de haver recomendação de adotar como 75% (Borba, 2006), o valor adotado de $f = 60\%$ foi o mais conservador previsto no relatório de implantação da unidade de biogás do aterro sanitário municipal de São José dos Campos (DNV, 2007).

Para o fator das incertezas (φ) foi utilizada a Equação 2.

$$\varphi = \frac{1}{(1 + \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2 + g^2})} \quad (2)$$

na qual $a = 2\%$, devido ao fato do peso aterrado ser aferido em balança antes da disposição; $b = 10\%$, devido ao parâmetro DOC_f não ser medido, sendo usado seu valor padrão; $c = 5\%$, por o aterro estar localizado em uma região tropical; $d = 3\%$, sendo um valor intermediário relativo ao fator F ; $e = 0\%$, devido ao aterro ser manejado; $g = 20\%$, por não se enquadrar nos critérios específicos do parâmetro. Dessa forma, o fator de incertezas foi determinado como $\varphi = 81,2\%$ (UNFCCC, 2015).

Para a massa de resíduos orgânicos aterrada em cada cenário analisado (W_{CC}) foi considerada a gravimetria realizada pela URBAM (URBAM, 2018b), que indicou que a fração orgânica representa 46,65% das 214.020 t/ano geradas no município (99.847 t/ano). Nos cenários em que parte dos resíduos orgânicos é destinada para a compostagem, essa parcela (W_{org}) é debitada do valor aterrado para cálculo das emissões do tipo de destinação.

As emissões geradas pela destinação na compostagem (GEE_{comp} , em tCO₂e/ano) foram calculadas conforme a Equação 3.

$$GEE_{comp} = (E_{CH_4} \cdot GWP_{CH_4} + E_{N_2O} \cdot GWP_{N_2O}) \cdot W_{org} \quad (3)$$

na qual E_{CH_4} é o fator de emissão do metano na compostagem, adotado como 4 kgCH₄ por tonelada de resíduo orgânico (Lim *et al.*, 2019); E_{N_2O} o fator de emissão do óxido nitroso na compostagem, adotado como 0,3 kgN₂O/t (Lim *et al.*, 2019); GWP_{N_2O} o potencial de aquecimento global do óxido nitroso, adotado como 310 vezes maior que o potencial da referência que é o gás carbônico (CO₂); W_{org} o peso de resíduos orgânicos que é compostado em cada cenário (ver Seção 4.3.1).

Além da destinação foram consideradas as emissões envolvidas na coleta dos resíduos orgânicos em cada cenário. A coleta comum que é realizada no município utiliza caminhões compactadores que possuem consumo de combustível (diesel) de 1,8 km/L (PMSJC, 2017). Já para a coleta segregada dos resíduos orgânicos a serem compostados foi proposto o uso de um veículo urbano de carga (VUC) no modelo de uma caminhonete

Ford F4000, cujo consumo de diesel foi adotado como 7,61 km/L (Matos *et al.*, 2017). As emissões geradas pela coleta comum (GEE_{CC} , em tCO₂e/ano) foram calculadas conforme a Equação 4.

$$GEE_{CC} = \frac{(d_{CC} - d_{evita}) \cdot (CD_{CO_2} \cdot GWP_{CO_2} + CD_{CH_4} \cdot GWP_{CH_4} + CD_{N_2O} \cdot GWP_{N_2O})}{1000 \cdot 1,8} \quad (4)$$

na qual d_{CC} é o deslocamento total da coleta comum no município, estimado em 1.225.128 km/ano (PMSJC, 2017); d_{evita} é o deslocamento que é evitado pelos caminhões compactadores da coleta comum devido a parte dos resíduos das feiras serem desviados do aterro em cada cenário; CD_{CO_2} é o fator de emissão de CO₂ para o diesel, adotado como 2,671 kgCO₂/L (Matos *et al.*, 2017); GWP_{CO_2} é o potencial de emissão do gás carbônico (CO₂), adotado como padrão o valor 1; CD_{CH_4} é o fator de emissão de CH₄ para o diesel, adotado como 0,00010 kgCH₄/L (Matos *et al.*, 2017); CD_{N_2O} é o fator de emissão de N₂O para o diesel, adotado como 0,00014 kgN₂O/L (Matos *et al.*, 2017).

Para o deslocamento que é evitado na coleta comum devido à compostagem (d_{evita}) foram determinados fatores de t/km da coleta comum para cada região do município (Sul, Oeste, Centro, Norte, Leste, Sudeste) e multiplicados pela massa de resíduos orgânicos que são enviados para compostagem em cada cenário (W_{org} , ver Seção 4.3.1). Para o fator t/km foram observadas na caracterização gravimétrica da URBAM a população e a geração per capita dos resíduos indiferenciados e os de limpeza urbana abrangidos pela coleta comum (Tabela 4) (URBAM, 2018b).

Tabela 4 – População e geração per capita dos resíduos da coleta comum (URBAM, 2018b).

Região	População (hab)	Geração indiferenciados (kg/hab.d)	Geração limpeza urb. (kg/hab.d)	Geração total (t/mês)
Sul	271.220	0,59	0,05	4.513
Oeste	47.805	0,89	0,17	1.318
Centro	83.752	0,83	0,09	2.003
Norte	69.449	0,67	0,06	1.318
Leste	186.968	0,61	0,04	3.160
Sudeste	53.190	0,51	0,04	761

Para os deslocamentos percorridos em cada região, um estudo da Prefeitura de São José dos Campos para concessão do serviço da coleta comum apresentou um levantamento dessas distâncias, a partir da divisão do município em 67 setores (cada setor representa um conjunto de bairros). Comparando a divisão do município em regiões com a divisão dos setores foi possível identificar o deslocamento da coleta comum em cada região, e consequentemente junto com os dados da Tabela 4 calcular um fator t/km para cada região (ver Seção 4.3.3) (Figura 11) (PMSJC, 2017).

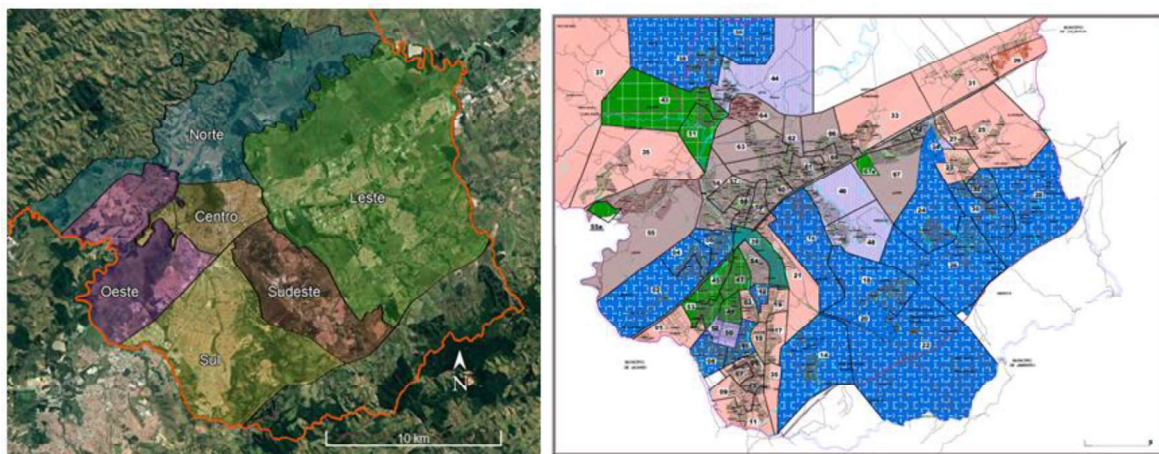


Figura 11 – Comparativo entre a divisão do município por regiões (esq.) e por setores (dir.) (PMSJC, 2017).

As emissões geradas pela coleta para compostagem (GEE_{F4000} , em tCO_2e/ano) foram calculadas conforme a Equação 5.

$$GEE_{F4000} = \frac{d_{F4000} \cdot (CD_{CO_2} \cdot GWP_{CO_2} + CD_{CH_4} \cdot GWP_{CH_4} + CD_{N_2O} \cdot GWP_{N_2O})}{1000 \cdot 7,61} \quad (5)$$

na qual d_{F4000} é o deslocamento total anual (km/ano) que a caminhonete F4000 deve percorrer para destinar uma quantidade diferente de resíduos orgânicos das feiras à compostagem em cada cenário. Para calcular esses deslocamentos em cada cenário, utilizando o *software Google Earth* foram estabelecidas rotas de coleta para cada dia que houvesse alguma feira sendo atendida em determinado cenário. Nessas rotas foram consideradas: a saída da caminhonete da unidade mais centralizada da URBAM, no bairro Vila Industrial (R. Dr. Ricardo Edwards, nº 100. Coordenadas geográficas de referência:

23°10'50,3"S; 45°51'25,5"O); distância até a primeira feira atendida no dia; distância até o componto da feira; distância até a próxima feira atendida e seu respectivo componto; retorno à unidade da URBAM (ver Seção 4.3.3).

Por fim, a estimativa das emissões totais de GEE geradas para um determinado cenário pode ser calculada pela Equação 6, que é a soma das parcelas anteriores.

$$GEE_{cenário} = GEE_{aterro} + GEE_{comp} + GEE_{CC} + GEE_{F4000} \quad (6)$$

Para ter uma noção do impacto econômico dessas emissões, foi considerado ainda um valor econômico para as emissões que poderiam ser evitadas em comparação ao cenário de aterramento atual. A quantidade de CO₂ evitada considera a comercialização de créditos de carbono, sendo adotado o preço médio de US\$ 9,10 por tonelada de carbono equivalente evitada (47,75 R\$/tCO₂e) (Paes *et al.*, 2020). As conversões de dólar americano para reais utilizaram o valor de R\$ 5,25 (BCB, 2021) e o custo de transação de 176 £/tCO₂e (cerca de 536 R\$/tCO₂e) para projetos que evitem até 100 tCO₂e/ano, relativo às despesas para certificação das emissões e registro dos projetos dentro de programas de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) (Yenneti & Gamaralalage, 2012).

4.2.4 Coleta de dados para estimativa de custos de instalação dos compontos

Os custos de instalação de cada componto consideraram: os insumos necessários para a montagem das composteiras (5 paletes e 5 m² de tela de sombrite para cada composteira, arame e grampos) e equipamentos para coleta segregada na feira e manejo das composteiras (contêineres de 240 L cada, forçado, termômetros, mangueira, etc) (EQP_{fixos}); e infraestrutura de galpão coberto (para evitar excesso de água nas composteiras por chuvas), com base impermeabilizada e canaletas de drenagem (IE).

A consideração da aquisição de equipamentos que poderiam ser compartilhados (EQP_{part}) nos casos da compostagem de resíduos orgânicos de mais do que 1 feira (em diferentes compontos, distribuídos próximos as suas respectivas feiras), seria: 1 balança para acompanhamento operacional da massa desviada de aterro (capacidade de pesagem de 200 kg); 1 triturador forrageiro com potência de 2 CV para adequação granulométrica do composto produzido, melhorando sua incorporação ao solo; e 1 veículo urbano de carga

(*VUC*) com capacidade de carga de pelo menos 1 tonelada, para transporte dos contêineres das feiras para os compontos. A balança e o triturador poderiam ser transportados para diferentes compontos, conforme necessidade, visto que só seriam utilizados 1 vez por semana para cada feira, a partir do momento em que iniciar o tratamento contínuo em cada componto.

O levantamento realizado através da montagem das composteiras em Amorim *et al.* (2021) e de orçamentos *on-line* em *sites* de equipamentos agrícolas e comércio de veículos no período entre janeiro e junho de 2021 obteve os preços dos insumos e equipamentos. Quanto à infraestrutura utilizada, a referência foi a tabela de custos unitários (sem desoneração) dos serviços de edificações da Secretaria Municipal de Infraestrutura e Obras do município de São Paulo, com data-base de janeiro de 2020 (SIURB, 2020). O custeio do veículo adotou como referência a caminhonete do modelo Ford F4000 (DNIT, 2012).

4.2.5 Coleta de dados para estimativa de custos de operação dos compontos

Os custos operacionais consideraram:

- Custo mensal de produção (*PROD*), contabilizando consumo de água em valor mínimo de 1000 L/mês para uso no componto; consumo de energia elétrica estimando o uso de 1 h/semana por componto do triturador forrageiro para trituração do composto final, baseado no experimento de Amorim *et al.* (2021); consumo mensal de combustível com deslocamento calculado conforme Seção 4.2.3; material de limpeza geral (água sanitária, desinfetante) em quantidade mensal unitária, para manutenção do componto;
- Análises laboratoriais mensais (*LAB*) de teor de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e coliformes termotolerantes para acompanhamento dos parâmetros de qualidade do composto produzido (SIMA, 2020);
- Mão de obra necessária para transporte dos contêineres das feiras até os compontos e para alimentação e manejo das composteiras (*M.O.*), de 2 auxiliares de serviços gerais, para evitar esforço excessivo. A remuneração base de R\$1.139,40 desses funcionários foi obtida de edital de concurso público da URBAM (URBAM, 2018a) e os encargos trabalhistas (13º salário: 8,33%, férias: 2,78%, descanso

semanal remunerado: 18,18%) e sociais (INSS: 20%, FGTS: 8%, rescisão: 3,2%) obtidos de Pereira (2017).

- Os equipamentos de proteção individual (*EPI*) em quantidades necessárias para o desenvolvimento seguro das atividades de compostagem (valores obtidos através de orçamento *on-line* em *sites* especializados na venda de *EPI*, no período entre janeiro e junho de 2021), consistindo de 2 botas de segurança, 2 aventais de segurança, 2 uniformes, 4 luvas de poliuretano ou nitrílica, e 4 protetores auriculares, por funcionário/ano.

É importante destacar que foi considerado que as áreas onde os compontos poderiam ser montados (Seção 4.2.6) já dispunham de instalação elétrica e hidráulica adequada para atendimento da demanda prevista, não sendo contabilizados custos para implantação de projeto elétrico ou captação de água para abastecimento.

4.2.6 Descrição e análise econômica dos cenários propostos

A análise da viabilidade de implantação de unidades descentralizadas de compostagem para tratamento dos resíduos de feiras livres comparou o cenário atual de destinação (CTA) (primeiro semestre de 2021) com três cenários propostos. No CTA os recicláveis da coleta seletiva são triados na Central de Triagem, e os orgânicos e rejeitos dispostos no aterro sanitário municipal, conforme procedimento operacional da URBAM.

A definição dos três cenários de comparação baseia-se na observação do porte de produção estimada de RSU das feiras livres (pelo levantamento da URBAM e balanço de massa de Amorim *et al.*, 2021), identificação dos Parques Urbanos e demais áreas propícias existentes no município para implantação dos compontos, localização das feiras livres e verificação de quais feiras se localizam dentro do raio estipulado de até 1 km de algum Parque. Os Parques selecionados estão em áreas públicas extensas, que já possuem infraestrutura e disponibilidade de água e energia, sendo áreas favoráveis para a implantação de compontos.

O primeiro cenário (2FC) considerou a mesma destinação do CTA, com a diferença de que os resíduos orgânicos estimados de 2 feiras na semana seriam transportados para uma área pública próxima da feira, onde poderiam implantar unidades da composteira proposta. Esse cenário considerou quais feiras geravam até 1.440 L/semana de RSU, pois,

segundo Amorim *et al.* (2021), até essa faixa 1 composteira/semana consegue receber todos os resíduos de feiras passíveis de compostagem. A Figura 12 ilustra a localização aproximada dessas feiras e dos Parques Urbanos, sendo que as cores indicam o dia da semana em que a feira ocorre.

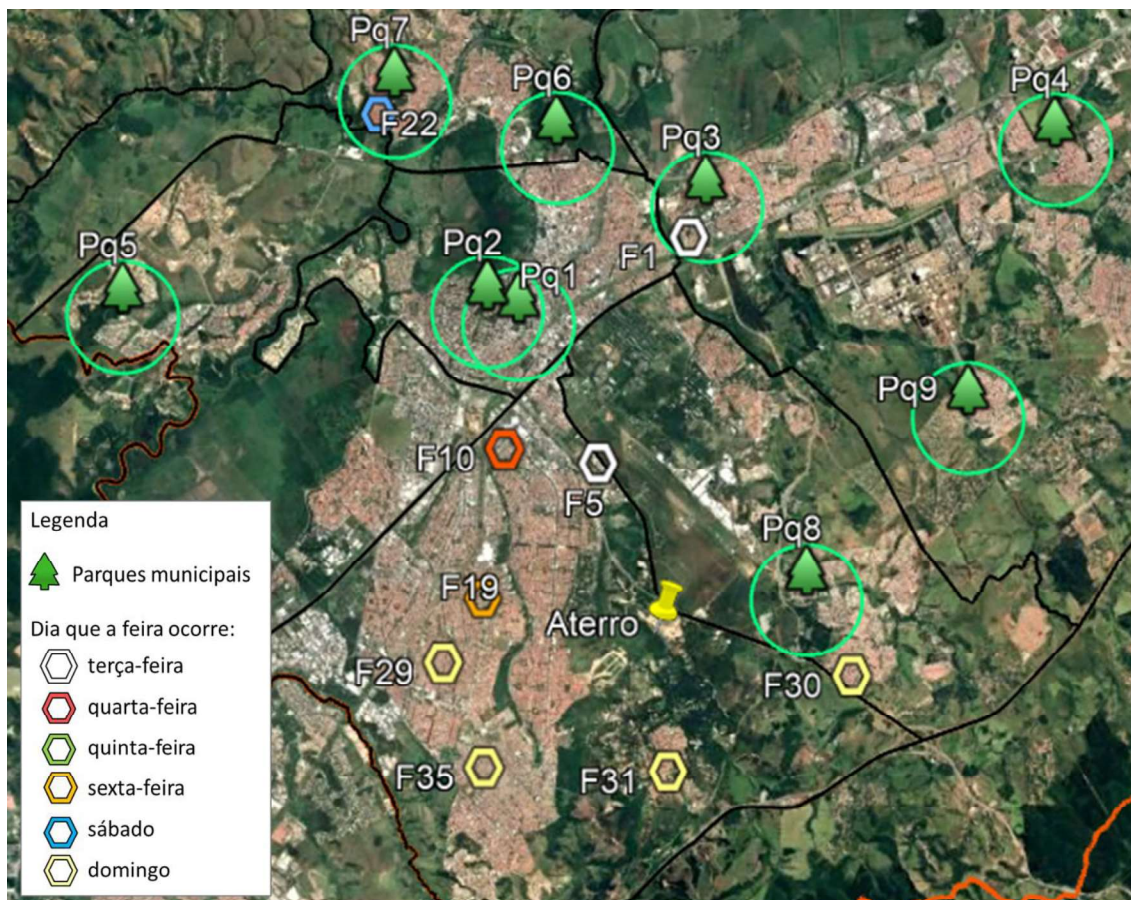


Figura 12 – Localização das 9 feiras que geram menos de 1.440 L de RSU por semana, e dos Parques Urbanos (com raio de 1 km)

Pela Figura 12 apenas as feiras F1 e F22 se localizam dentro de um raio de até 1 km de algum Parque Urbano. O primeiro cenário (2FC) contempla a compostagem de apenas essas 2 feiras. O segundo cenário (9FC) também considerou a destinação de CTA, com a diferença de que aconteceria a compostagem dos resíduos orgânicos estimados para todas as 9 feiras que geram até 1.440 L/semana ao invés de destinados para aterro (feiras F1, F5, F10, F19, F22, F29, F30, F31 e F35). Como observado na Figura 12, nesse cenário 7 das 9 feiras não estão dentro do raio de 1 km de algum Parque Urbano, e o interessado em operar

o projeto teria que identificar locais próximos dessas feiras onde o composto pudesse ser montado.

O terceiro cenário (22FC) considerou a mesma destinação do CTA, com a diferença de compostar os resíduos orgânicos de todas as feiras com geração de até 2.880 L/semana de RSU, o que requereria maior área em alguns pontos, pois algumas feiras demandariam uso de 2 composteiras/semana. A Figura 13 ilustra a localização dessas feiras no município, sendo para o cenário 22FC selecionadas as feiras F1, F2, F3, F4, F5, F7, F8, F10, F11, F15, F17, F19, F20, F22, F23, F24, F25, F29, F30, F31, F33 e F35.

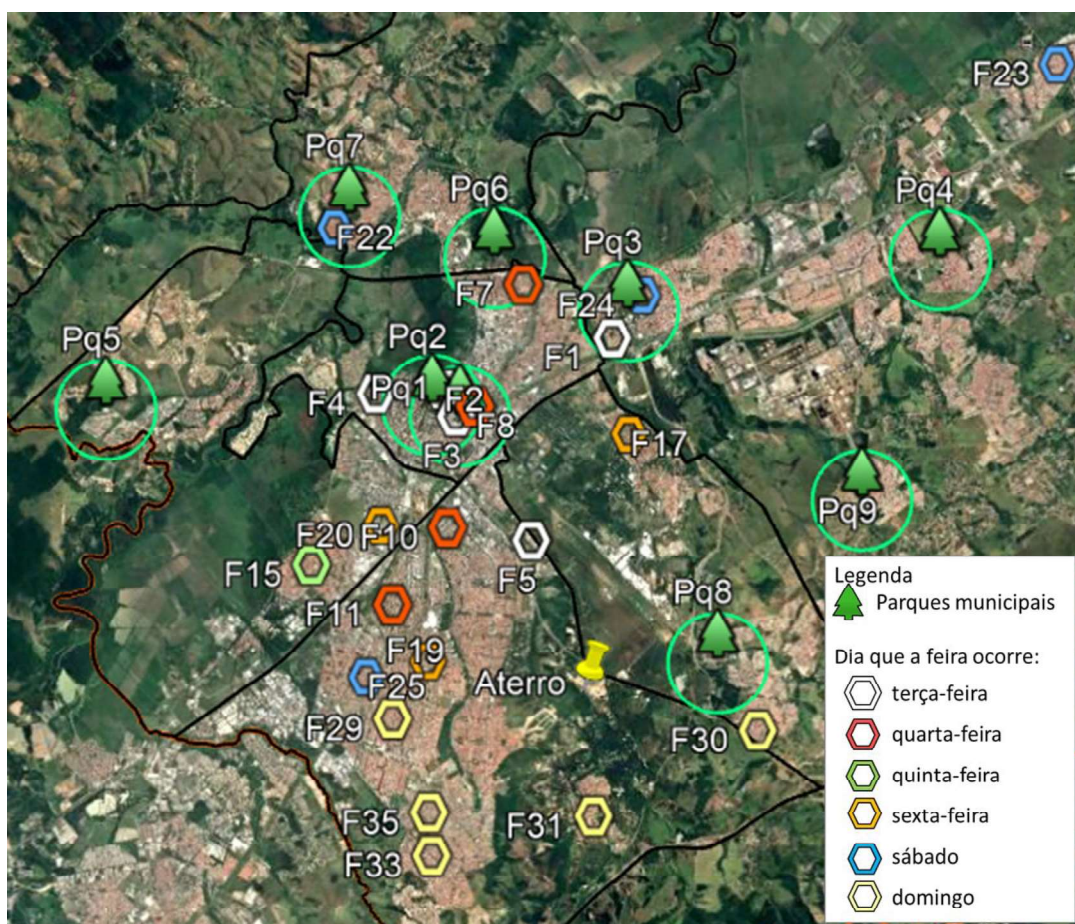


Figura 13 – Localização das 22 feiras que geram até 2880 L de RSU por semana

A avaliação de cada cenário adotou 2 fontes de recursos disponíveis para custeio, “At” e “CC”. “At” considera apenas a economia de aterro evitada com a quantidade de resíduos de feira compostados ao invés de aterrados (W_{org} , em t/mês), sendo adotado o custo da tonelada aterrada em 2021 no aterro sanitário municipal, informado pela

URBAM, no valor de 81,00 R\$/t. Já “CC” considera a economia na coleta comum dos resíduos urbanos devido à destinação de parte dos orgânicos da feira para compostagem nos compontos (W_{org}), o que libera espaço nos caminhões para coleta dos resíduos nos bairros, implicando em menos viagens para o aterro sanitário. Para esse componente foi adotado o valor de 155,46 R\$/t, obtido a partir de um edital de concessão da coleta comum em São José dos Campos, com a atualização do preço do combustível diesel para 4,60 R\$/L (PMSJC, 2017).

Não foi considerado o potencial de arrecadação com a venda do composto produzido (estimado em 125 R\$/t, Slomski *et al.*, 2020), pois há restrições em sua aplicação (MAPA, 2009; MAPA, 2020), sendo previsto que este seria utilizado para a arborização urbana, principalmente nos parques e áreas verdes próximos dos compontos.

Cada cenário considerou 6 situações com diferentes níveis de despesas, sendo S1 a situação que demanda maior investimento, e S6 a situação na qual a maioria das demandas necessárias consegue ser compatibilizada por insumos e mão de obra já existentes. De S1 a S6 as demandas são excluídas na seguinte ordem, para reduzir os custos de investimento (Figura 14):

- *M.O.*: necessidade de contratação de mão de obra exclusiva para a compostagem; ou funcionários já contratados podem ser utilizados para operação das composteiras. No segundo caso, em cada cenário foi considerado um valor proporcional da remuneração da jornada mensal de 160 horas dos funcionários, relativo ao tempo despendido de 45 minutos para cada feira atendida pela compostagem (tempo estimado para deslocamento até a feira, carregamento dos contêineres com os resíduos orgânicos, deslocamento até o componto e alimentação das composteiras);
- *LAB*: necessidade da realização de análises laboratoriais mensais para controle de qualidade do composto; ou dispensa pela Resolução SIMA nº 69/2020 (baixo impacto, sem comercialização do composto);
- *VUC*: necessidade de aquisição de veículo urbano de carga para transporte dos resíduos das feiras para seus respectivos compontos; ou se já há veículo adquirido que possa ser utilizado;
- *IE*: necessidade de instalação de galpão coberto e com base impermeabilizada; ou se o local do componto já dispõe de infraestrutura que possa ser aproveitada;

- *PLT*: necessidade de aquisição dos paletes para montagem das composteiras; ou possibilidade de obtenção sem custos do descarte de empreendimentos, que utilizam paletes em seus estabelecimentos e depois pagam por sua destinação.

Além dessas despesas, cada situação considera ainda os custos de equipamentos por componente (EQP_{fixos}) e compartilhados (EQP_{part}), e os custos mensais de produção ($PROD$) citados nas Seções 4.2.4 e 4.2.5.

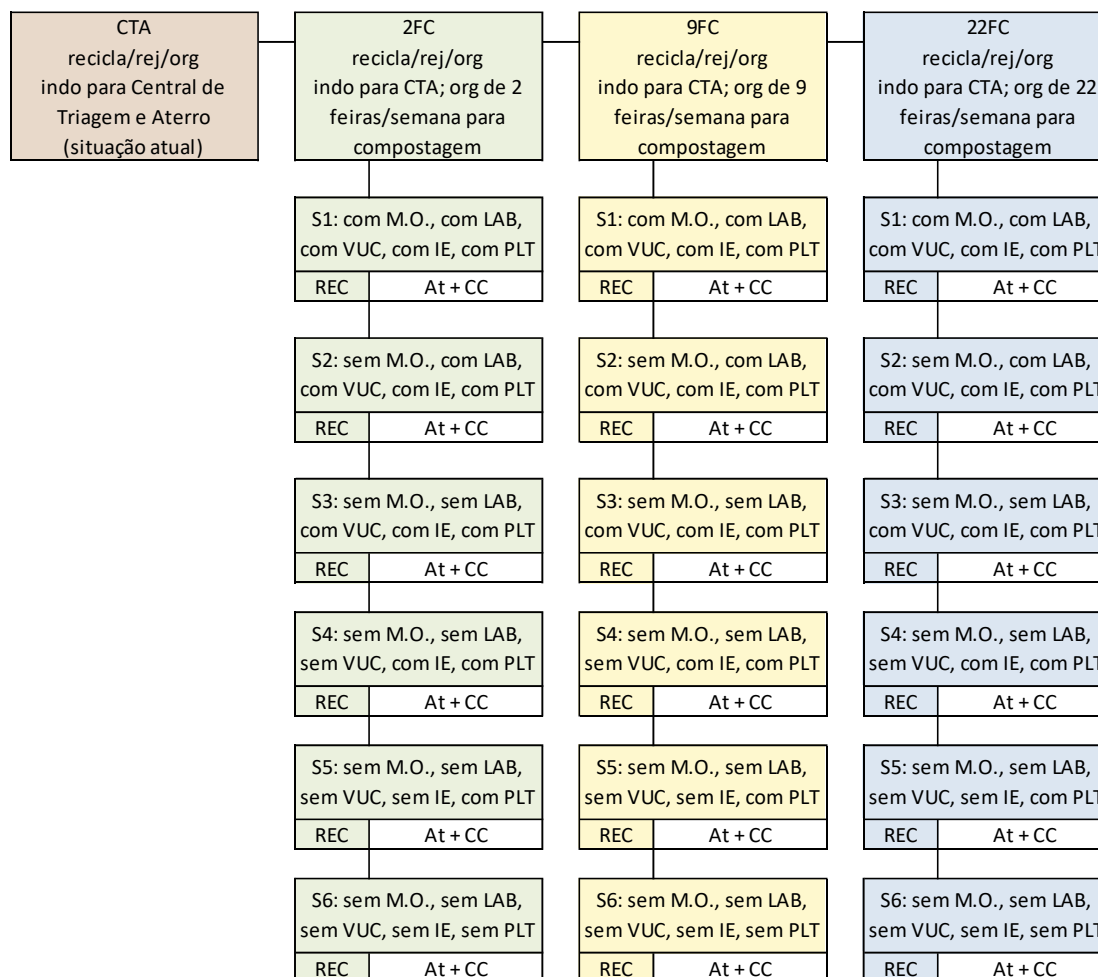


Figura 14 – Cenários analisados para as diferentes situações de despesas e receitas

Para que uma alternativa seja considerada economicamente viável é necessário que o aporte de receitas traga retorno satisfatório para o interessado, dentro de um período que este considere aceitável. Visto que em consulta à URBAM a informação é de que o aterro sanitário municipal possui vida útil estimada em 10 anos a partir de 2021, e que há

preferência e intenção de implantação de alternativas para tratamento no próprio município, o estudo adotou o tempo de 10 anos como referência para o retorno adequado do investimento (URBAM, 2020).

Baseado na Figura 14, os custos mensais de operação (C_{opera}) em cada situação (S1 a S6) foram calculados segundo a Equação 7, e os custos de instalação ($C_{instala}$) pela Equação 8.

$$C_{opera} = M.O. + LAB + PROD + EPI \quad (7)$$

$$C_{instala} = VUC + IE + PLT + EQP_{fixos} + EQP_{part} \quad (8)$$

Considerando as receitas e os custos de instalação e operação, o tempo de retorno (Tr) para quitação do investimento necessário foi calculado, para verificar a viabilidade econômica de cada cenário. O cálculo do Tr (em anos) utilizou a Equação 9, que considerou o custo de instalação ($C_{instala}$, em R\$) feito em $t = 0$, e a diferença entre as receitas mensais ($At + CC$, em R\$/mês) e os custos operacionais mensais (C_{opera} , em R\$/mês) para as datas de $t > 0$ (Pires, 2011; Leow *et al.*, 2019; Lim *et al.*, 2019).

$$T_r = \frac{C_{instala}}{12 \cdot (At + CC - C_{opera})} \quad (9)$$

Para os cenários com situações economicamente viáveis dentro de 10 anos, o potencial de arrecadação ($P_{arrecad}$, em R\$) após o tempo de retorno foi calculado pela Equação 10.

$$P_{arrecad} = 12 \cdot (At + CC - C_{opera}) \cdot (10 - T_r) \quad (10)$$

E para os cenários com situações economicamente inviáveis dentro de 10 anos, a Equação 9 foi manipulada para se determinar qual teria de ser o custo economizado com a destinação no cenário atual para viabilizar tal situação (C_{viab} , em R\$/t), fornecendo uma referência para comparação da proposta com outras alternativas de destinação que venham a ser consideradas pelos tomadores de decisão (Equação 11).

$$10 = \frac{C_{instala}}{12 \cdot [(C_{viab} \cdot W_{org}) - C_{opera}]}$$

$$C_{viab} = \frac{C_{instala} + 120 \cdot C_{opera}}{120 \cdot W_{org}} \quad (11)$$

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Dimensionamento do componto

Considerando o tempo mínimo de compostagem de 2 meses para bioestabilização do composto (Amorim *et al.*, 2021), um componto planejado para receber até 900 L/semana de resíduos orgânicos demandaria a instalação de 9 composteiras de paletes para manter o tratamento contínuo por bateladas ao longo do ano, conforme exemplifica a Figura 15. Na figura, composteiras em branco estão disponíveis para receber resíduos, as com cor mais clara estão preenchidas na data sinalizada, e a de cor mais escura denota que o composto final está pronto para ser retirado.

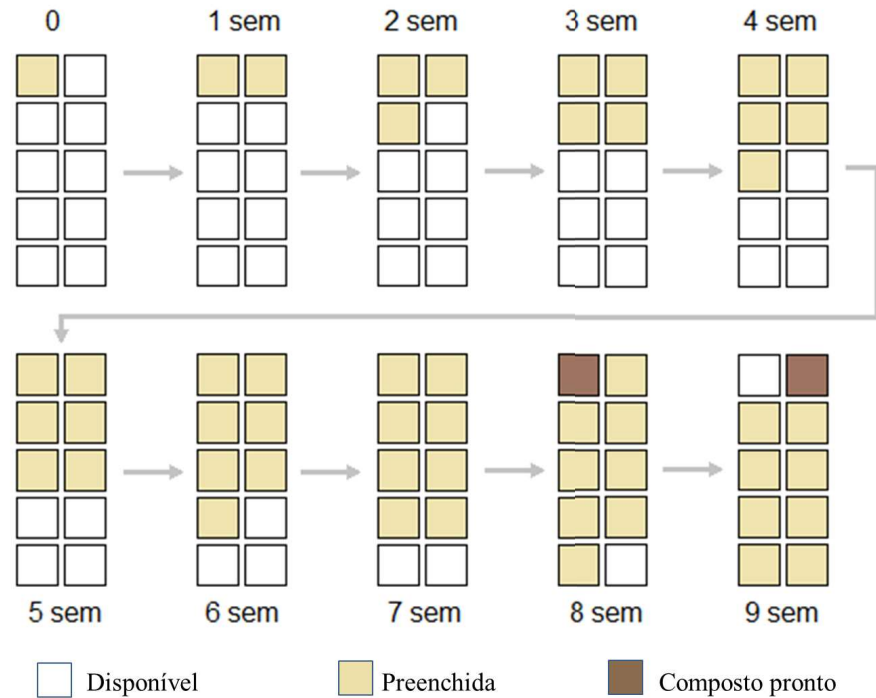


Figura 15 – Alimentação das composteiras até estabilização do composto final

Considerando o peso específico aparente de 197 kg/m^3 para os resíduos orgânicos (Amorim *et al.*, 2021), o cenário 2FC poderia compostar $W_{org} = 1,19 \text{ t/mês}$ (297 kg de resíduos por semana), o cenário 9FC $W_{org} = 5,23 \text{ t/mês}$ e o cenário 22FC $W_{org} = 20,19 \text{ t/mês}$.

Como cada composteira ocupa 1 m^2 , e é desejado um espaço adicional de $1,5 \text{ m}$ ao redor do conjunto de composteiras (Seção 4.2.2) a área estimada para a instalação de um composto com, por exemplo, 10 composteiras, seria de 40 m^2 (5 m de largura por 8 m de comprimento) (Figura 16).

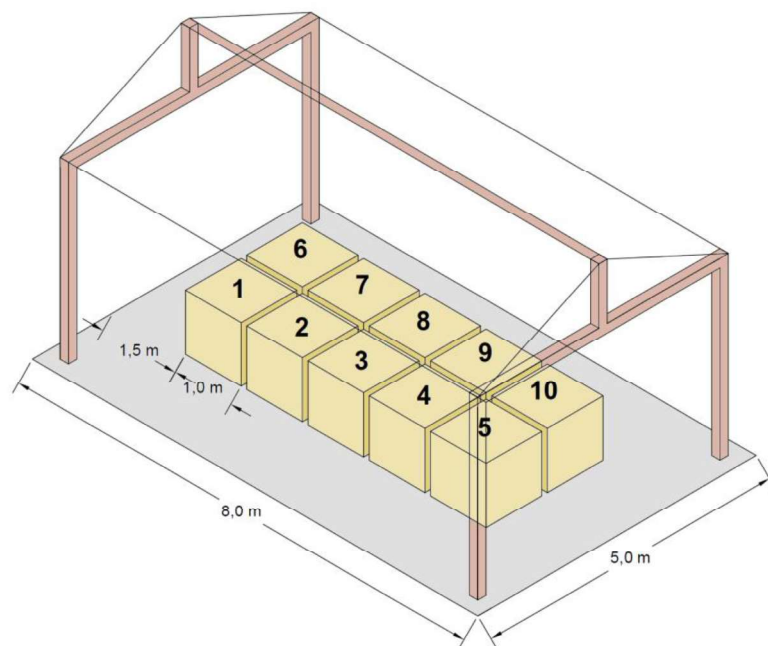


Figura 16 – Representação da área ocupada por um composto com 10 composteiras

4.3.2 Dados dos cenários

As Tabelas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 contêm mais informações sobre as feiras selecionadas para os cenários 2FC, 9FC e 22FC respectivamente, considerando que os galpões dos compostos possuem largura fixa de 5 m e a área de cada composto calculada conforme a Seção 4.2.2.

Tabela 5 – Detalhamento das feiras consideradas no cenário 2FC

ID	Feira	Dia	Parque	Porte (L/sem)	Quantid. composteiras	Área (m ²)
F1	Resid. Tatetuba	Terça-feira	Pq3	960	6	30
F22	Altos de Santana	Sábado	Pq7	1440	9	40

Tabela 6 – Detalhamento das feiras consideradas no cenário 9FC

ID	Feira	Dia	Parque	Porte (L/sem)	Quantid. composteiras	Área (m ²)
F1	Resid. Tatetuba	Terça-feira	Pq3	960	6	30
F5	Jd. Uirá	Terça-feira	Indef.	1200	8	35
F10	Jd. Satélite	Quarta-feira	Indef.	1440	9	40
F19	Jd. do Céu	Sexta-feira	Indef.	960	6	30
F22	Altos de Santana	Sábado	Pq7	1440	9	40
F29	Jd. Morumbi	Domingo	Indef.	1440	9	40
F30	São Judas Tadeu	Domingo	Indef.	960	6	30
F31	Pq. Interlagos	Domingo	Indef.	1200	8	35
F35	Campo dos Alemães	Domingo	Indef.	960	6	30

Tabela 7 – Detalhamento das feiras consideradas no cenário 22FC

ID	Feira	Dia	Parque	Porte (L/sem)	Quantid. composteiras	Área (m ²)
F1	Resid. Tatetuba	Terça-feira	Pq3	960	6	30
F2	Vila Igualdade	Terça-feira	Pq1, Pq2	2400	15	55
F3	Vila Adyana	Terça-feira	Pq1, Pq2	2400	15	55
F4	Jd. Esplanada II	Terça-feira	Indef.	2400	15	55
F5	Jd. Uirá	Terça-feira	Indef.	1200	8	35
F7	Vila Maria	Quarta-feira	Pq6	1920	12	45
F8	Jd. São Dimas	Quarta-feira	Pq1	2400	15	55
F10	Jd. Satélite	Quarta-feira	Indef.	1440	9	40
F11	Pq. Industrial	Quarta-feira	Indef.	1920	12	45
F15	Jd. das Indústrias	Quinta-feira	Indef.	2400	15	55
F17	Jd. da Granja	Sexta-feira	Indef.	2400	15	55
F19	Jd. do Céu	Sexta-feira	Indef.	960	6	30
F20	Jd. Aquários	Sexta-feira	Indef.	2400	15	55
F22	Altos de Santana	Sábado	Pq7	1440	9	40
F23	Resid. Galo Branco	Sábado	Indef.	2400	15	55
F24	Vila Industrial	Sábado	Pq3	2400	15	55
F25	Pq. Industrial	Sábado	Indef.	1920	12	45
F29	Jd. Morumbi	Domingo	Indef.	1440	9	40
F30	São Judas Tadeu	Domingo	Indef.	960	6	30
F31	Pq. Interlagos	Domingo	Indef.	1200	8	35
F33	Colonial	Domingo	Indef.	2880	18	60
F35	Campo dos Alemães	Domingo	Indef.	960	6	30

Estimando a quantidade de resíduos orgânicos compostados em cada cenário (W_{org}), o 2FC deve tratar 1,19 t/mês, o 9FC 5,23 t/mês e o 22FC 20,19 t/mês. Já a produção de composto orgânico de cada cenário segue a média de 22,8% (em peso) de composto produzido a partir da massa inicial de resíduos (Amorim *et al.*, 2021), sendo respectivamente de 0,27 t/mês, 1,19 t/mês e 4,61 t/mês.

4.3.3 Estimativa dos impactos ambientais com emissões

Para as emissões geradas com aterro (GEE_{aterro}) e compostagem (GEE_{comp}) em cada cenário (calculadas pelas Equações 1 e 3), as quantidades de resíduos orgânicos aterrada (W_{CC}) e compostada (W_{org}) foram definidas conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Pesos (t/ano) e emissões de GEE (tCO₂e/ano) do aterro e da compostagem em cada cenário proposto.

Cenário	W_{CC}	W_{org}	GEE_{aterro}	GEE_{comp}
CTA	99.847	0	30.636	0
2FC	99.832	14	30.632	3
9FC	99.784	63	30.617	11
22FC	99.604	242	30.562	43

Para as emissões geradas na coleta dos resíduos, inicialmente foi calculada a influência que a compostagem teve sobre o deslocamento do serviço da coleta comum em cada cenário (d_{evita}). Para isso, o fator t/km para cada região do município (ver Seção 4.2.3) apresentou os valores da Tabela 9.

Tabela 9 – Deslocamento evitado na coleta comum (km/mês) devido à implantação da compostagem em cada cenário.

Região	d_{CC} km/mês	W_{CC} t/mês	t/km	W_{org} (t/mês)			d_{evita} (km/mês)		
				2FC	9FC	22FC	2FC	9FC	22FC
Sul	25.292	4.513	0,178	0	3,56	6,89	0	20	39
Oeste	10.414	1.318	0,127	0	0	2,38	0	0	19
Centro	15.870	2.003	0,126	0	0	5,70	0	0	45
Norte	12.519	1.318	0,105	0,71	0,71	0,71	7	7	7
Leste	29.823	3.160	0,106	0,48	0,48	2,85	4	4	27
Sudeste	8.176	761	0,093	0	0,48	1,66	0	5	18
TOTAL	102.094	13.072		1,19	5,23	20,19	11	36	154

Os deslocamentos (km/ano) da coleta comum (d_{CC} , descontado d_{evita}) e da compostagem (d_{F4000}), bem como suas emissões (GEE_{CC} e GEE_{F4000} , respectivamente, em tCO₂e/ano) constam na Tabela 10.

Tabela 10 – Deslocamentos (km/ano) e emissões (tCO₂e/ano) da coleta comum e da compostagem para cada cenário.

Cenário	d_{CC}	GEE_{CC}	d_{F4000}	GEE_{F4000}
CTA	1.225.128	1.847,78	0	0
2FC	1.224.993	1.847,58	912	0,33
9FC	1.224.692	1.847,12	4.872	1,74
22FC	1.223.279	1.844,99	10.493	3,74

As emissões de GEE totais de cada cenário (GEE_{cenário}) foram determinadas conforme a Equação 6, estando apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Emissões de GEE (tCO₂e/ano) de cada cenário proposto.

Cenário	GEE_{aterro}	GEE_{CC}	GEE_{comp}	GEE_{F4000}	GEE_{cenário}
CTA	30.636	1.847,78	0	0	32.484
2FC	30.632	1.847,58	3	0,33	32.482
9FC	30.617	1.847,12	11	1,74	32.477
22FC	30.562	1.844,99	43	3,74	32.453

Pela Tabela 11 percebe-se que, apesar de modesta, a proposta da implantação da compostagem contribui para a redução da emissão total de GEE no manejo dos resíduos orgânicos no município. Quanto à ordem de grandeza das emissões, quando dividida pela massa de resíduos que está sendo destinada obtém-se o valor de 0,325 tCO₂e/t, o que está em acordo com outros estudos como o valor de 0,680 tCO₂e/t em Bringhenti *et al.* (2017) e 0,630 tCO₂e/ano em Lim *et al.* (2019). A principal diferença nos valores ocorre devido ao fator *f* adotado da captura de metano nos aterros sanitários, sendo que para o presente estudo foi adotado o valor de 60% (ver Seção 4.2.3), enquanto que nas referências consideraram que não havia captura de metano nos aterros. Com isso, as propostas de compostagem das referências citadas apresentou um maior benefício na redução de emissões de GEE do que no presente estudo, pois no aterro sanitário de São José dos Campos já há essa medida implantada para controle das emissões.

Observa-se que para as propostas o principal benefício nas emissões residiu na mudança da destinação, enquanto que a coleta dos resíduos resultou em uma geração ligeiramente superior para os cenários que contemplavam compostagem. Apesar do veículo adotado para a coleta segregada da compostagem (caminhonete F4000) ter um

consumo de diesel muito mais econômico do que os caminhões compactadores da coleta comum (7,61 e 1,8 km/L, respectivamente), a coleta da compostagem não teve um impacto positivo na análise das emissões, pois as distâncias a serem percorridas para atender as feiras selecionadas em cada dia foram bastante elevadas (d_{F4000} , Tabela 10), o que superou também o benefício das distâncias evitadas para a coleta comum (d_{evita}). Sobre o potencial de redução de emissões na compostagem descentralizada, o estudo de Adhikari *et al.* (2010) indicou que os ganhos na coleta com essa alternativa poderiam reduzir em até 40% as emissões, porém comparou o cenário de coleta e aterro com um cenário no qual os resíduos orgânicos seriam destinados por compostagem doméstica, reduzindo drasticamente a necessidade da coleta, pois os resíduos seriam tratados nas residências. Lim *et al.* (2019) também obtiveram conclusão semelhante quando observaram que em um projeto de compostagem comunitária, apesar da mudança de destinação de aterro para compostagem reduzir as emissões de 0,630 para 0,177 tCO₂e/t, a coleta e transporte até o aterro era a operação que mais gerava emissões (1,053 tCO₂e/t).

Outro ponto de destaque advém da consideração de Lim *et al.* (2019) sobre as emissões que podem ser evitadas com a aquisição de fertilizantes devido ao uso do composto produzido a partir dos resíduos. No estudo calcularam que o uso do composto poderia contribuir para redução de 23% das emissões geradas, quando comparado a um cenário com destinação dos resíduos orgânicos apenas para aterro. No presente estudo esse benefício não foi contemplado, devido ao fato de não se ter realizado análises químicas para determinar os teores de nutrientes (N, P, K, micronutrientes, etc) dos compostos, informação necessária para permitir o cálculo da quantidade de fertilizante equivalente.

Por fim, além do impacto ambiental, a redução de emissões poderia ser utilizada também como uma fonte de receita, caso houvesse viabilidade da certificação dessas emissões evitadas e sua comercialização como créditos de carbono (custos de transação). Entretanto, a quantidade de emissões evitadas em cada cenário em relação a CTA é inferior a 100 tCO₂e/ano, o que segundo Yenneti e Gamaralalage (2012) implica em um custo de transação maior do que 536 R\$/tCO₂e. Como o valor adotado para comercialização de créditos de carbono foi de 47,75 R\$/tCO₂e, os custos superariam a receita potencial, não sendo viável considerar essa possibilidade. Ainda assim, como os custos de transação caem drasticamente com o aumento das emissões que são evitadas, caso sejam identificadas oportunidades para compostar uma maior quantidade de resíduos orgânicos e reduzir o deslocamento da coleta, há potencial do manejo mais sustentável dos resíduos orgânicos

ser uma fonte interessante de recursos através da comercialização de créditos de carbono. A emissão dos 30.636 tCO₂e/ano do cenário atual (CTA), provenientes do aterro de 99.847 t/ano de resíduos orgânicos, implicam em um desperdício anual de R\$ 1.462.873,05 que poderiam ser recebidos através de mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL).

4.3.4 Viabilidade econômica dos cenários

As despesas citadas na Seção 4.2.4 dos custos de instalação estão apresentadas nas Tabelas Tabela 12 à Tabela 16.

Tabela 12 – Despesas com equipamentos por componto (EQP_{fixos})

Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário (R\$)
Forcado	Unid.	1	80,00
Termômetro digital 0 a 100 °C	Unid.	2	25,00
Mangueira 30 m	Unid.	1	50,00
Balde 20 L	Unid.	2	25,00
Carrinho de mão	Unid.	1	180,00
Rolo de 10 m de arame galvanizado	Unid.	1	20,00
Grampeador e grampos	Unid.	1	35,00
Tela sombrite 50%	m ²	variável	4,00

Tabela 13 – Despesas com paletes para montagem das composteiras (PLT).

Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário (R\$)
Paletes madeira (1,00 x 1,00 x 0,15 m)	Unid.	variável	30,00

A quantidade de paletes e de tela de sombrite variam conforme a quantidade de composteiras montadas em cada cenário, sendo necessários 5 paletes e 5 m² de tela de sombrite para cada composteira. É importante ressaltar que é comum a consideração dos paletes como resíduos que precisam ser descartados por diversos tipos de empreendimentos industriais, de modo que é um item que pode ser obtido de doação de empresas e indústrias, dispensando custos de aquisição.

Tabela 14 – Despesas com equipamentos que podem ser compartilhados entre pontos (EQP_{part})

Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário (R\$)
Balança (capacidade 200 kg)	Unid.	1	1.200,00
Triturador forrageiro 2 CV	Unid.	1	1.050,00
Contêiner para coleta de 240 L	Unid.	variável	303,00

A quantidade de contêineres para coleta dos resíduos de feira varia conforme o cenário. A feira F22 gera 1.440 L/semana de RSU, sendo 902 L (178 kg) de orgânicos passíveis de serem compostados Amorim *et al.*, 2021), o que demandaria 4 contêineres de 240 L para a coleta. No cenário 2FC, que contempla apenas as feiras F1 (ocorre terça-feira e gera 960 L/semana) e F22 (ocorre sábado e gera 1.440 L/semana), os 4 contêineres da F22 podem ser aproveitados para a F1, não sendo necessária a aquisição de mais do que 4 contêineres para o cenário. Para o cenário 9FC seriam necessários 12 contêineres e para o 22FC 25 contêineres.

Tabela 15 – Despesas com o veículo da coleta segregada nas feiras (VUC).

Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário (R\$)
Veículo urbano de carga (F4000)	Unid.	1	170.000,00

Tabela 16 – Despesas com infraestrutura (IE)

Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário (R\$)
Base em camada de argamassa impermeabilizante feita com cimento-areia, espessura 20 mm	m ²	variável	43,35
Canaletas em alvenaria, com 20 cm de largura	m	variável	58,53
Caixa d'água 500 L aterrada para receber chorume	Unid.	1 por componto	250,00
Estrutura de pontaletes para sustentação de telhado	m ²	variável	146,57
Estrutura de madeira com vão entre 7 e 10 m para sustentação de telhado	m ²	variável	107,60
Instalação de telha ondulada 6 mm	m ²	variável	39,66
Instalação de cumeeira em telha ondulada	m	variável	46,11

Os valores sem desoneração obtidos das tabelas da SIURB para a construção dos galpões de compostagem costumam ser superiores aos praticados no mercado devido aos efeitos de barganha, cotação e escala (Timm, 2018), de modo que o custo de infraestrutura levantado neste estudo pode estar ligeiramente superestimado.

As despesas citadas na Seção 4.2.5 dos custos de operação estão apresentadas nas Tabelas Tabela 17 à Tabela 20.

Tabela 17 – Despesas mensais de produção por componto (PROD)

Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário (R\$)
Energia elétrica	kWh/mês	5,96	0,53
Água e esgoto	m ³ /mês	1	2,49
Material de limpeza	Unid./mês	1	20,00

Em relação ao combustível gasto em cada cenário, foram considerados os deslocamentos da Tabela 10 (d_{F4000}), o consumo de diesel de 7,61 km/L (Matos *et al.*,

2017) e o preço do diesel de 4,60 R\$/L (Gaspas, 2021), resultando em uma despesa de 45,94 R\$/mês para o 2FC, 245,41 R\$/mês para o 9FC e 528,55 R\$/mês para o 22FC.

Tabela 18 – Despesas com análises laboratoriais para controle de qualidade da compostagem (LAB).

Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário (R\$)
Análise laboratorial de COT	Unid./mês	1	40,00
Análise laboratorial de NTK	Unid./mês	1	40,00
Análise laboratorial de coliformes termotolerantes	Unid./mês	1	95,00

Em relação às análises laboratoriais, apesar de serem parâmetros importantes para o controle da operação, a escala de tratamento proposta e a destinação do composto produzido para arborização urbana (sem fins comerciais) permitem a dispensa de licenciamento ambiental e possivelmente dispensa de condicionantes que imponham as análises em frequência mensal (SIMA, 2020).

Para as despesas com mão de obra (*M.O.*) foi considerado o salário de 1.828,66 R\$/mês para cada funcionário, e 2 funcionários para atender a até 3 feiras por dia (URBAM, 2018a). Nas situações S2 a S6 em cada cenário a mão de obra foi compatibilizada com a já existente, sendo considerada apenas uma proporção da remuneração dos funcionários em relação às horas trabalhadas neste projeto em cada cenário. Considerando o tempo de 45 minutos para cada feira, a proporção da despesa no cenário 2FC foi de 90 min/semana (1,5 h/semana) em uma jornada semanal de 40 h, resultando em 137,15 R\$/mês. Da mesma forma, para as situações S2 a S6 a despesa com mão de obra no cenário 9FC foi de 617,17 R\$/mês e no 22FC de 3.017,28 R\$/mês.

Tabela 19 – Despesas mensais com equipamentos de proteção individual (EPI)

Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$/mês)
Bota de segurança	Unid./mês	4/12 = 0,33	30,00	10,00
Aventais de PVS	Unid./mês	4/12 = 0,33	12,00	4,00
Uniforme	Unid./mês	4/12 = 0,67	48,00	16,00
Luvras de poliuretano ou nitrílica	Unid./mês	8/12 = 0,67	10,00	6,67
Protetor auricular	Unid./mês	8/12 = 0,67	12,00	8,00
TOTAL				44,67

As receitas citadas na Seção 4.2.6 com os custos evitados da operação de aterro (81,00 R\$/t) e da coleta comum (155,46 R\$/t) estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 – Receitas com custos evitados nas operações de aterro (At) e coleta comum (CC) dos RSU.

Cenário	W _{org} (t/mês)	At (R\$/mês)	CC (R\$/mês)	At+CC (R\$/mês)
2FC	1,19	96,19	184,62	280,81
9FC	5,23	423,25	812,32	1.235,57
22FC	20,19	1.635,28	3.138,52	4.773,79

A maioria dos trabalhos de compostagem descentralizada considera que a mão de obra voluntária é um dos fatores que colaboram para redução de custos, tanto para compostagem doméstica (na qual a população ficaria responsável pela operação) quanto na compostagem comunitária (como por exemplo, associações de bairros) (Adhikari *et al.*, 2010; Leow *et al.*, 2019; Lim *et al.*, 2019). Entretanto estes trabalhos mencionam que o interesse da população em aderir a um projeto de compostagem descentralizada pode ser um obstáculo para sua implantação, demandando maior esforço para conscientização sobre responsabilidade socioambiental, capacitação para operação e previsão de incentivos (Swagemakers *et al.*, 2018; Lu *et al.*, 2020). Para evitar essa questão do nível de participação da população, na análise de viabilidade econômica deste estudo foi considerado que a operação da compostagem seria realizada pela empresa responsável pela gestão de RSU no município (URBAM), seus parceiros (cooperativas de reciclagem) e/ou

pela Prefeitura Municipal (PMSJC), sendo avaliado tanto o custo da contratação de novos funcionários exclusivamente para esta operação quanto a compatibilização de funcionários já existentes para diminuir esse custo (custo proporcional às horas trabalhadas com compostagem em cada cenário. Ver Seção 4.2.6).

É importante destacar que a maioria dos estudos na literatura utiliza referências de aplicações em outras localidades para generalizar o desempenho e custos da implantação de sistemas de compostagem descentralizadas em escalas maiores, como a geração total de um município, Estado ou país (Gomes *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2017; Tonini *et al.*, 2020). A adoção de dados locais de desempenho e custos envolvidos a partir do piloto de compostagem desenvolvido em Amorim *et al.* (2021) colabora para uma abordagem mais específica dos requisitos e benefícios que cada localidade poderá apresentar, tal como abordado por Leow *et al.* (2019) e Lim *et al.* (2019).

As Tabelas Tabela 21 à Tabela 23 apresentam um resumo das despesas e receitas para os cenários 2FC, 9FC e 22FC respectivamente, com destaque para os itens que variam entre as situações S1 a S6 citadas na Seção 4.2.6. A Tabela 24 compila os custos de instalação e operação de cada cenário.

Tabela 21 – Resumo das despesas e receitas para o cenário 2FC

2FC	DESPESAS									RECEITAS
	M.O.	LAB	PROD	EPI	VUC	IE	PLT	EQ fixos	EQ part	At+CC
	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$/mês
S1	3.657,31	350,00	97,24	44,67	170.000,00	29.196,42	450,00	2.442,00	2.250,00	280,81
S2	137,15	350,00	97,24	44,67	170.000,00	29.196,42	450,00	2.442,00	2.250,00	280,81
S3	137,15	-	97,24	44,67	170.000,00	29.196,42	450,00	2.442,00	2.250,00	280,81
S4	137,15	-	97,24	44,67	-	29.196,42	450,00	2.442,00	2.250,00	280,81
S5	137,15	-	97,24	44,67	-	-	450,00	2.442,00	2.250,00	280,81
S6	137,15	-	97,24	44,67	-	-	-	2.442,00	2.250,00	280,81

Tabela 22 – Resumo das despesas e receitas para o cenário 9FC

9FC	DESPESAS									RECEITAS
	M.O.	LAB	PROD	EPI	VUC	IE	PLT	EQ fixos	EQ part	At+CC
	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$/mês
S1	3.657,31	1.575,00	476,27	44,67	170.000,00	180.221,80	2.010,00	9.161,00	2.250,00	1.235,57
S2	617,17	1.575,00	476,27	44,67	170.000,00	180.221,80	2.010,00	9.161,00	2.250,00	1.235,57
S3	617,17	-	476,27	44,67	170.000,00	180.221,80	2.010,00	9.161,00	2.250,00	1.235,57
S4	617,17	-	476,27	44,67	-	180.221,80	2.010,00	9.161,00	2.250,00	1.235,57
S5	617,17	-	476,27	44,67	-	-	2.010,00	9.161,00	2.250,00	1.235,57
S6	617,17	-	476,27	44,67	-	-	-	9.161,00	2.250,00	1.235,57

Tabela 23 – Resumo das despesas e receitas para o cenário 22FC

22FC	DESPESAS									RECEITAS
	M.O.	LAB	PROD	EPI	VUC	IE	PLT	EQ fixos	EQ part	At+CC
	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$/mês	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$/mês
S1	7.314,63	3.850,00	1.092,87	89,33	340.000,00	879.842,60	7.680,00	22.925,00	4.500,00	4.773,79
S2	3.017,28	3.850,00	1.092,87	89,33	340.000,00	879.842,60	7.680,00	22.925,00	4.500,00	4.773,79
S3	3.017,28	-	1.092,87	89,33	340.000,00	879.842,60	7.680,00	22.925,00	4.500,00	4.773,79
S4	3.017,28	-	1.092,87	89,33	-	879.842,60	7.680,00	22.925,00	4.500,00	4.773,79
S5	3.017,28	-	1.092,87	89,33	-	-	7.680,00	22.925,00	4.500,00	4.773,79
S6	3.017,28	-	1.092,87	89,33	-	-	-	22.925,00	4.500,00	4.773,79

Tabela 24 – Custos de instalação e operação para cada cenário em cada situação

Situação	Custo	2FC	9FC	22FC
S1	Instalação (R\$)	204.338,42	363.642,80	1.254.947,60
	Operação (R\$/mês)	4.149,22	5.753,25	12.345,83
S2	Instalação (R\$)	204.338,42	363.642,80	1.254.947,60
	Operação (R\$/mês)	629,06	2.713,11	8.049,48
S3	Instalação (R\$)	204.338,42	363.642,80	1.254.947,60
	Operação (R\$/mês)	279,06	1.138,11	4.199,48
S4	Instalação (R\$)	34.338,42	193.642,80	914.947,60
	Operação (R\$/mês)	279,06	1.138,11	4.199,48
S5	Instalação (R\$)	5.142,00	13.421,00	35.105,00
	Operação (R\$/mês)	279,06	1.138,11	4.199,48
S6	Instalação (R\$)	4.692,00	11.411,00	27.425,00
	Operação (R\$/mês)	279,06	1.138,11	4.199,48

Pela Tabela 24 os cenários propostos variam entre um nível de investimento mínimo de R\$ 4.692,00 para a instalação de 2 pontos na situação com menos requisitos (S6) do cenário 2FC, até o investimento de R\$ 1.254.947,60 para a instalação de 22 pontos na situação mais exigente (S1) do cenário 22FC.

Comparando os custos de operação da Tabela 24 com as receitas nas Tabelas Tabela 21 à Tabela 23, percebe-se que nenhum cenário apresentou arrecadação suficiente para cobrir as despesas mensais nas situações S1 e S2. Como a arrecadação não cobre as despesas mensais, nas situações citadas não há recurso disponível para a quitação dos

custos de instalação, e conclui-se que a implantação dos cenários nestas situações é economicamente inviável para a fonte de receita considerada.

No estudo de Lim *et al.* (2019) situação semelhante também foi observada, na qual um projeto de compostagem comunitária não se sustentava apenas com a economia dos custos com aterro e coleta, sendo proposta a integração do tratamento com um sistema de produção agrícola a partir de parte do composto produzido, como forma de inteirar a receita e o projeto atingir sustentabilidade econômica. É interessante destacar que em Lim *et al.* (2019) os autores consideraram um preço de venda do composto na Malásia equivalente a R\$ 934/t, o que é muito superior ao valor de referência citado por Slomski *et al.* (2020) para o Brasil de R\$ 125/t. Caso a comercialização do composto fosse considerada como uma fonte de receita naquele valor, mais situações poderiam ser viáveis no presente estudo.

4.3.5 Tempo de retorno para cada cenário

Nas demais situações, a arrecadação nos cenários foi suficiente para cobrir as despesas mensais, permitindo sobra para quitação do investimento com a instalação. A Tabela 25 compila os resultados obtidos para o cálculo do tempo de retorno (em anos) de cada cenário em cada situação. Na tabela, o símbolo “N” (célula de cor avermelhada) indica que a situação não possui viabilidade econômica, como citado no tópico anterior; células de cor amarelada indicam que a situação possui tempo de retorno superior a 10 anos, que é o tempo estimado para o fim da vida útil do aterro sanitário municipal; e células de cor esverdeada indicam que a situação possui tempo de retorno inferior a 10 anos, sendo situações mais interessantes.

Tabela 25 – Tempo de retorno (em anos) de cada cenário em cada situação

Tr (anos)	2FC	9FC	22FC
S1	N	N	N
S2	N	N	N
S3	9.708,3	310,9	182,1
S4	1.631,4	165,6	132,8
S5	244,3	11,5	5,1
S6	222,9	9,8	4,0

Pelos resultados a implantação de uma maior quantidade de compostos aparenta otimizar o uso dos recursos, ao mesmo tempo em que aumenta as receitas com a maior quantidade de resíduos que é desviada de aterro e da coleta comum. Leow *et al.* (2019) obtiveram conclusão semelhante, observando que um sistema de compostagem comunitária na Malásia só seria economicamente sustentável se o tratamento dos resíduos fosse expandido de 100 para 3.000 habitantes.

O cenário 2FC não apresentou o tempo de retorno desejável para nenhuma das situações estudadas, sendo economicamente inviável a implantação e manutenção de apenas 2 compostos no horizonte considerado de 10 anos para as fontes de receita consideradas. Para os cenários 9FC e 22FC, as situações com menos requisitos (S5 e S6) foram as únicas que apresentaram viabilidade econômica para um tempo de retorno inferior a 10 anos, sendo situações nas quais a implantação da compostagem proposta é mais vantajosa do que a manutenção da destinação dos resíduos orgânicos das feiras para o aterro sanitário.

A mão de obra exclusiva na S1 e as análises de laboratório na S2 são despesas mensais que superam as fontes de receita consideradas, e por isso inviabilizaram os cenários. Sobre S2, como citado na Seção 4.2.6 o fato de a compostagem proposta se enquadrar como de baixo impacto não exige análises frequentes, de modo que esse é um item de despesa que, apesar de interessante para o controle de qualidade, provavelmente pode ser desprezado. Sobre S1, como observado no monitoramento em Amorim *et al.* (2021), a operação das composteiras pelo modelo proposto não demanda muito tempo nem esforço, mas caso a URBAM, a Prefeitura de São José dos Campos ou outro interessado na proposta tenha interesse em implantar compostos, deve avaliar a possibilidade de compatibilizar a carga horária de funcionários já constantes em seu quadro para atuar na operação das composteiras. Os custos da mão de obra exclusiva também foram relatados como impeditivos para a viabilidade econômica de projetos de compostagem estudados por Adhikari *et al.* (2010), Leow *et al.* (2019) e Lim *et al.* (2019), sendo destacada a necessidade de uso de mão de obra voluntária em sistemas de compostagem comunitária e doméstica.

Sobre as situações S3 e S4, apesar das receitas superarem as despesas mensais, o valor residual estende demais o tempo para quitação dos investimentos a serem feitos com compra de paletes, instalação do galpão e aquisição de veículo exclusivo para a compostagem, com o tempo de retorno ficando entre 133 e 9.709 anos, sendo considerados

também economicamente inviáveis em comparação ao tempo de vida útil de 10 anos do aterro sanitário. Para viabilizar a compostagem dos resíduos das feiras pelo modelo proposto seria necessário avaliar se nas áreas escolhidas para instalação dos compontos já haveria espaços cobertos e impermeabilizados que poderiam ser utilizados, além de ter que utilizar veículo de carga já constante na frota municipal, da URBAM ou outro interessado. Lee *et al.* (2017) citam que os custos de instalação do tratamento mais próximo da fonte podem ser mais caros do que de sistemas centralizados, mas que, devido aos benefícios contínuos como a redução de emissões de GEE com coleta, produção de composto com menos contaminantes e redução da necessidade de tratamento de lixiviado, ao longo do tempo a alternativa descentralizada pode ser mais econômica.

Para as situações S5 e S6 (as quais diferem apenas pela aquisição dos paletes para montagem das composteiras) os cenários 9FC e 22FC apresentaram tempo de retorno próximo aos 10 anos da vida útil do aterro, demonstrando em alguns casos maior viabilidade econômica do que a manutenção da destinação para aterro dentro deste período. Concluído o período do tempo de retorno (*Tr*), a Tabela 26 apresenta o quanto os cenários 9FC e 22FC poderiam economizar livremente até o fim do período de interesse de 10 anos, com a arrecadação calculada pela Equação 10 ficando entre R\$ 284,11 e R\$ 41.492,01.

Tabela 26 – Potencial de arrecadação em cada cenário viável no período de interesse

Cenário	Situação	Tr (anos)	Tempo até 10 anos (anos)	Receita (R\$/ano)	Custo de operação (R\$/ano)	Arrecadado no período (R\$)
9FC	S6	9,8	0,2	14.826,84	13.657,33	284,11
22FC	S5	5,1	4,9	57.285,50	50.393,80	33.812,01
	S6	4,0	6,0	57.285,50	50.393,80	41.492,01

Apesar de demandar uma quantidade maior de informações sobre os sistemas de gestão de RSU, estudos que utilizam o método da Análise do Ciclo de Vida (ACV) na análise dos impactos ambientais dessa alternativa abrangem uma maior quantidade de impactos, permitindo identificar também mais oportunidades relacionadas à compostagem (Jensen *et al.*, 2016, Mersoni & Reichert, 2017; Liikanen *et al.*, 2018). No presente estudo foram consideradas como fontes de receita apenas o custo que já é pago em São José dos

Campos para aterrar resíduos e o custo da coleta comum. Porém, a utilização da compostagem descentralizada como uma alternativa mais sustentável para a destinação dos resíduos orgânicos pode gerar outros impactos positivos (créditos de carbono, potencial agrícola do composto, economia com fertilizantes, comercialização do composto, economia com tratamento de efluentes no aterro, etc) que podem colaborar para a viabilidade econômica desses sistemas (Blair *et al.*, 2014; Lu *et al.*, 2020).

A Tabela 27 apresenta os cálculos pela Equação 11 de quanto teria que ser o custo de manejo dos resíduos em São José dos Campos (ao invés dos $155,46 + 81,00 = 236,46$ R\$/t da coleta comum e destinação no aterro sanitário) para que as propostas de compostagem deste estudo fossem viáveis dentro de 10 anos em cada situação de cada cenário.

Tabela 27 - Custo de destinação hipotético dos resíduos urbanos (R\$/t) para viabilizar a proposta de compostagem em cada situação de cada cenário

C_{viab} (R\$/t)	2FC	9FC	22FC
S1	4.927,77	1.680,98	1.129,59
S2	1.963,58	1.099,17	916,73
S3	1.668,86	797,75	726,02
S4	475,94	526,63	585,68
S5	271,07	239,21	222,50
S6	267,91	236,01	219,33

Em consulta à URBAM foi informado que, com a proximidade do fim da vida útil do aterro municipal, há intenção de manter a destinação dos resíduos urbanos dentro dos limites do próprio município, com interesse na implantação de alternativas de tratamento ao invés da implantação de novo aterro, o que pode elevar o custo atual de destinação dos resíduos urbanos. Paes *et al.* (2020) estimam que a instalação e operação de aterros sanitários novos em municípios brasileiros entre 250.000 e 1.000.000 habitantes custa 116,02 R\$/t, e unidades de compostagem centralizadas 208,88 R\$/t. Adhikari *et al.* (2010) adotam para União Europeia e Canadá os valores de referência de 165 US\$/t para aterros sanitários (293 R\$/t), 241 US\$/t para unidades de compostagem centralizada (428 R\$/t), 118 R\$/t para compostagem comunitária (209 R\$/t) e 42 R\$/t para compostagem doméstica (74 R\$/t), considerando os custos de instalação e operação da destinação e também os custos da coleta. Com o provável aumento dos custos de destinação dentro dos próximos 10 anos em São José dos Campos, os cenários devem ganhar atratividade para as situações S5 e S6, sendo alternativas interessantes de serem consideradas.

O sistema de tratamento descentralizado proposto neste estudo, apesar de não abranger uma porcentagem expressiva dos resíduos orgânicos municipais, apresenta uma contribuição à gestão de resíduos na medida em que preenche uma lacuna da falta de referências econômicas para sistemas de compostagem descentralizados, sobretudo na literatura nacional. A metodologia utilizada fornece uma referência para que interessados tenham uma noção dos custos e benefícios de uma aplicação real de tratamento por sistema de compostagem descentralizada de baixo custo, podendo ser adaptada conforme os interessados identifiquem oportunidades que facilitem a implantação de compostos.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo analisou a viabilidade econômica da implantação de compostagem descentralizada de baixo custo como destinação alternativa para os resíduos orgânicos de feiras do município brasileiro de São José dos Campos/SP. Foram considerados diferentes níveis de despesas e receitas para avaliar a sustentabilidade econômica de cada cenário dentro de um tempo de retorno desejado de 10 anos.

A análise dos impactos ambientais da destinação dos resíduos orgânicos indicou que o cenário atual (CTA, focado em aterramento) possui emissões de GEE de 30.636 tCO₂e/ano, o que equivale a um desperdício anual de R\$ 1,46 milhões com emissões. Os resultados indicaram que, mesmo de forma modesta, os cenários propostos de compostagem de baixo custo podem colaborar para a redução das emissões do município, por usarem uma alternativa de menor impacto ambiental do que o aterro.

Sobre a análise econômica, apenas as situações com menos requisito (S5 e S6) apresentaram viabilidade econômica dentro do tempo de retorno de 10 anos, indicando que seria necessário um investimento com a instalação de compostos entre R\$ 11.411,00 (9FC em S6, tratando 5,23 t/mês) e R\$ 35.105,00 (22FC em S5, tratando 20,19 t/mês). Para essas situações, o potencial de arrecadação já descontando os custos operacionais seria entre R\$ 284,11 (9FC em S6) e R\$ 41.492,01 (22FC em S6), enquanto que com a manutenção do aterramento haveria apenas despesas.

O estudo fornece uma contribuição à gestão de resíduos no município, apresentando os requisitos e benefícios da implantação de uma alternativa mais sustentável para a destinação dos resíduos orgânicos das feiras livres. A compostagem feita de forma descentralizada pode ainda apresentar vantagens em relação a variáveis não exploradas

neste estudo, de modo que os cenários propostos podem ser ainda mais atrativos, a depender das oportunidades identificadas pelos interessados.

6 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020. São Paulo, 2020.

Adhikari, B.K., Trémier, A., Martinez, J., Barrington, S. Home and community composting for on-site treatment of urban organic waste: perspective for Europe and Canada. *Waste Management & Research*. 2010.

Amorim, P.L.L., Souza, R.G., Sales, I.J.S. Avaliação de compostagem descentralizada de baixo custo para resíduos orgânicos de feiras urbanas. Working paper. 2021.

APHA – American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 2017.

ASTM – American Society for Testing and Materials. D5231-92 Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste. 2008.

Ayres, M., Ayres, D.L., Santos, A.A.S. BioEstat – aplicações estatísticas nas áreas das ciências biomédicas. Belém, 2007.

BCB – Banco Central do Brasil. Consulta de cotações e boletins – consulta dólar dos EUA entre 31/07/2021 e 31/08/2021. Disponível em: < https://www.bcb.gov.br/estabilidade_financeira/historicocotacoes>. Acessado em abril/2021.

Blair, A., Hollands, G., McIntosh, K., MacDonald, A., Mehta, B., Umali, H., Pagsuyoin, S. Alternative management of organic waste in Chatam-Kent, Ontario, Canada. *Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*. 2014.

Bortolotti, A., Kampelmann, S. Muynck, S. Decentralised Organic Resource Treatments e Classification and comparison through Extended Material Flow Analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2018.

Borba, S.M.P. Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários: Estudo de caso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2006.

Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.

Bringhenti, J.R., Barreto, G.A.R., Gunther, W.M.R., Korres, A.M.N. Avaliação de sustentabilidade aplicada a iniciativas de compostagem e vermicompostagem de resíduos orgânicos: Estudo de caso em instituições de ensino superior. Congresso ABES/FENASAN. 2017.

Brito, M.J.C. Processo de compostagem de resíduos urbanos em pequena escala e potencial de utilização do composto como substrato. Universidade de Tiradentes. Aracaju, 2008.

Cekmecelioglu, D., Demirci, A., Graves, R.E., Davitt, N.H. Optimization of windrow food waste composting to inactivate pathogenic microorganisms. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2005.

Chen, Y. A cost analysis of food waste composting in Taiwan. Sustainability. 2016.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Quadro de fabricantes de veículos. 2012.

DNV – Det Norske Veritas Certification Ltd. Relatório de validação “URBAM/Arauna/ – projeto de gás de aterro sanitário (UAPGAS)” no Brasil. Relatório nº 2007-0086, Revisão nº 01. 2007.

Falahi, M., Avami, A. Optimization of the municipal solid waste management system using a hybrid life cycle assessment–emergy approach in Tehran. Journal of Material Cycles and Waste Management. 2020.

Faverial, J., Sierra, J. Home composting of household biodegradable wastes under the tropical conditions of Guadeloupe (French Antilles). Journal of Cleaner Production. 2014.

Fehr, M. Measuring the environmental impact of waste flow management in Brazilian apartment buildings. Environment Development and Sustainability. 2009.

Ferreira, C.A., Silva, H.D., Andrade, G.C., Magalhães, W.L.E. Módulo para compostagem rápida de resíduos orgânicos na pequena propriedade. Embrapa Florestas. 2005.

Galvão, R.G. Compostagem em áreas urbanas: lições aprendidas no projeto feiras e jardins sustentáveis da Lapa, São Paulo – SP, Brasil. Universidade Nove de Julho. São Paulo, 2019.

Gaspas. São José dos Campos – Preço dos combustíveis. Disponível em: < <https://precodoscombustiveis.com.br/pt-br/city/brasil/sao-paulo/sao-jose-dos-campos/3825> >. Acessado em agosto de 2021.

Gomes, L.P., Kohl, C.A., Souza, C.L.L., Rempel, N., Miranda, L.A.S., Moraes, C.A.M. Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2015.

Grosso, M., Nava, C., Testori, R., Rigamonti, L., Viganò, F. The implementation of anaerobic digestion of food waste in a highly populated urban area: an LCA evaluation. Waste Management & Research. 2012.

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. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2020. Disponível em: <https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2020/POP2020_20210331.pdf>. Acesso em junho/2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama do município de São José dos Campos. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-jose-dos-campos/panorama>>. Acessado em abril/2021.

Inácio, C. T., Miller, P. R. M. Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos. Embrapa solos. Rio de Janeiro, 2009.

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5, Chapter 3: Solid Waste Disposal. 2006.

Jensen, M.B., Moller, J., Scheutz, C. Comparison of the organic waste management systems in the Danish–German border region using life cycle assessment (LCA). Waste Management. 2016.

Keng, Z.X., Chong, S., Ng, C.G., Ridzuan, N.I., Hanson, S., Pan, G., Lau, P.L., Supramaniam, C.V., Singh, A., Chin, C.F., Lam, H.L. Community-scale composting for food waste: A life-cycle assessmentsupported case study. Journal of Cleaner Production. 2020.

Kinuthia, P.K. Urban solid waste management system using Geographic Information Systems (GIS): A case study of Kayole – Soweto, Nairobi. University of Nairobi. 2005.

Kuroda, Y.B.S.M., Matsumoto, M.Y.N. Feasibility study of a passive aeration reactor equipped with vertical pipes for compost stabilization of cow manure. Waste Management & Research. 2006.

- Leow, C. W. Bong, C.P., Chua, L.S., Muhamad, I.I., Lee, C.T., Li, C., Klemes, J.J. Feasibility study of composting and anaerobic digestion plant at community scale in Malaysia. *Waste and Biomass Valorization*. 2019.
- Liikanen, M., Havukainen, J., Viana, E., Horttanainen, M. Steps towards more environmentally sustainable municipal solid waste management e A life cycle assessment study of São Paulo, Brazil. *Journal of Cleaner Production*. 2018.
- Lim, L.Y., Lee, C.T., Bong, C.P., Lim, J.S., Klemes, J.J. Environmental and economic feasibility of an integrated community composting plant and organic farm in Malaysia. *Journal of Environmental Management*. 2019.
- Lima Junior, R.G.S., Mahler, C.F., Dias, A.C., Luz Junior, W.F. Avaliação de novas práticas de compostagem em pequena escala com aproveitamento energético. *Engenharia Ambiental e Sanitária*. 2017.
- Liu, G., Hao, Y., Dong, L., Yang, Z., Zhang, Y., Ulgiati, S. An emergy-LCA analysis of municipal solid waste management. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017.
- Lu, H.R., Qu, X., Hanandeh, A.E. Towards a better environment - the municipal organic waste management in Brisbane: Environmental life cycle and cost perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2020.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 27, 05 de junho de 2006, que se refere às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas para produção, importação ou comercialização de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes. Brasília, 2006.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 25, 23 de junho de 2009, que trata 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. Brasília, 2009.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos. Brasília, 2017.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Brasília, 2020.

Matos, V.N., Santos, J.O., Marinho, M.M.O., Andrade, J.C.S. Quantificação de emissões de gases de efeito estufa no transporte de resíduos: Estudo de caso da UFBA. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)*. 2017.

McNeese, B. Bartlett's Test for Equality of Variances. BPI Consulting, 2009. Disponível em: < <https://www.spcforexcel.com/knowledge/comparing-processes/bartletts-test-for-equality-variances> >.

McLeod, C.A., Terazawa, M., Yamamura, E. Using Geographical Information Systems to Evaluate Decentralized Management of Municipal Food Waste. *Compost Science & Utilization*. 1997.

Mersoni, C., Reichert, G.A. Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2017.

Minitab. Replicações e repetições em experimentos planejados. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/basics/replicates-and-repeats-in-designed-experiments/>>. Acessado em agosto/2020.

Nair, J., Okamitsu, K. Microbial inoculants for small scale composting of putrescible kitchen wastes. *Waste Management*. 2010.

Nord, E. Qualidade química na compostagem de alguns resíduos urbanos com inoculação biológica. Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2012.

Oliveira, L.S.B.L., Oliveira, D.S.B.L., Bezerra, B.S., Pereira, B.S., Battistelle, R.A.G. Environmental analysis of organic waste treatment focusing on composting scenarios. *Journal of Cleaner Production*. 2017.

Ogunwande, G.A., Osunade, J.A. Passive aeration composting of chicken litter: Effects of aeration pipe orientation and perforation size on losses of compost elements. *Journal of Environmental Management*. 2011.

Padmi, T., Dewiandratika, M., Damanhuri, E. An environmental and economic comparison of fruit and vegetable waste treatment in the traditional markets. *International Journal of GEOMATE*. 2018.

Paes, M.X., Medeiros, G.A., Mancini, S.D., Gasol, C., Pons, J.R., Durany, X.G. Transition towards eco-efficiency in municipal solid waste management to reduce GHG emissions: The case of Brazil. *Journal of Cleaner Production*. 2020.

Pai, S., Ai, N., Zheng, J. Decentralized community composting feasibility analysis for residential food waste: A Chicago case study. *Sustainable Cities and Society*. 2019.

Pereira, F.M.R. Encargos sociais e custos do trabalho: Uma análise comparativa entre o Brasil e os Estados Unidos. Diferenças na legislação e os impactos na economia. Universidade de Brasília. 2017.

Pires, A.B. Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema de Compostagem Acelerada para Resíduos Sólidos Urbanos. Universidade de Passo Fundo. 2011.

PMSJC - Prefeitura Municipal de São José dos Campos. Pregão presencial nº 002/2017, para prestação de serviços de coleta regular e transporte de resíduos sólidos domiciliar/público no município de São José dos Campos. São José dos Campos, 2017.

PMSJC - Prefeitura Municipal de São José dos Campos. Feiras. Disponível em: <<https://www.sjc.sp.gov.br/servicos/inovacao-e-desenvolvimento-economico/turismo/feiras/>>. Acesso em dezembro de 2020.

PMSJC – Prefeitura de São José dos Campos. São José em dados. Disponível em: <<https://www.sjc.sp.gov.br/servicos/governanca/sao-jose-em-dados/>>. Acesso em junho de 2021.

Razali, N.M., Wah, Y.B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*. 2011.

Sabki M.H., Lee C.T., Bong C.P.C., Klemes J.J. A review on the economic feasibility of composting for organic waste management in asian countries. *Chemical Engineering Transactions*. 2018.

Silva, A.S.F. Avaliação do processo de compostagem com diferentes proporções de resíduos de limpeza urbana e restos de alimentos. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2016.

SIMA – Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente. Resolução SIMA nº 69 de 08 de setembro de 2020. Dispõe sobre a dispensa de licenciamento ambiental das atividades de compostagem e vermicompostagem de resíduos orgânicos compostáveis de baixo impacto ambiental, sob condições determinadas. São Paulo, 2020.

Siqueira, T.M.O. Compostagem de resíduos sólidos urbanos no Estado de São Paulo. Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. São Carlos, 2014.

SIURB – Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras de São Paulo. Tabelas de custos sem desoneração para Infraestrutura Urbana. Disponível em:

<https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/tabelas_de_custos/index.php?p=310197>. Acessado em dezembro de 2020.

Slomski, V.G., Lima, I.C.S., Slomski, V., Slavov, T. Pathways to urban sustainability: An investigation of the economic potential of untreated household solid waste (HSW) in the city of São Paulo. Sustainability. 2020.

SMA – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Plano de resíduos sólidos do estado de São Paulo. São Paulo, 2014.

Souza, L.A., Carmo, D.F., Silva, F.C. Uso de microrganismos eficazes em compostagem de resíduos sólidos orgânicos de feira e restaurante. Rio de Janeiro, 2019.

Swagemakers, P., Garcia, M.D.D., Wiskerke, J.S.C. Socially-Inclusive Development and Value Creation: How a Composting Project in Galicia (Spain) ‘Hit the Rocks’. Sustainability. 2018.

Timm, L.L. Sistemas Referenciais de Custos Rodoviários Federais: evolução histórica e métodos de reajuste. Universidade de Brasília. Brasília, 2018.

Tonini, D., Wandl, A., Meister, K., Unceta, P.M., Taelman, S.E., Sanjuan-Delmás, D., Dewulf, J., Huygens, D. Quantitative sustainability assessment of household food waste management in the Amsterdam Metropolitan Area. Resources, Conservation & Recycling. 2020.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. Methodological tool. TOOL04: Emissions from solid waste disposal sites. Version 08.0. 2015.

URBAM – Urbanizadora Municipal. Edital de concurso público n.º 07/18. Concurso público para o cargo de Auxiliar de serviços gerais. 2018a.

URBAM – Urbanizadora Municipal. Estudo de Caracterização Gravimétrica São José dos Campos – SP. 2018b.

URBAM – Urbanizadora Municipal. Questionário de transição 2020. Disponível em: <<https://www.sjc.sp.gov.br/transicao/URBAM/AAA%20-20Question%C3%A1rio%20Final%20Transi%C3%A7%C3%A3o%202020.pdf>>. Acessado em abril de 2021.

Vásquez, M.A., Sen, R., Soto, M. Physico-chemical and biological characteristics of compost from decentralised composting programmes. Bioresource Technology. 2015.

Vaz, L.M.S., Costa, B.N., Gusmão, O.S., Azevedo, L.S. Diagnóstico dos resíduos sólidos produzidos em uma feira livre: o caso da feira do Tomba. Sitientibus. Feira de Santana, 2003.

Wichuk, K.M., McCartney, D. A review of the effectiveness of current time-temperature regulations on pathogen inactivation during composting. *Journal of Environmental Engineering and Science*. 2007.

Yenneti, K.; Gamaralalage, P.J.D. Carbon Finance and Decentralized Composting in Asia: Potential and Future Considerations. *Environment and Urbanization Asia*. 2012.

Zhou, H., Meng, A., Long, Y., Li, Q., Zhang, Y. Classification and comparison of municipal solid waste based on thermochemical characteristics. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2014.