

Compostagem em escala piloto para resíduos sólidos orgânicos gerando biofertilizantes sólidos e líquidos e material de forração

Pilot-scale composting for organic solid waste generating solid and liquid biofertilizers and bedding material

Compostaje a escala piloto de residuos sólidos orgánicos generando biofertilizantes sólidos y líquidos y material de cama

Recebido: 24/02/2024 | Revisado: 03/03/2024 | Aceitado: 04/03/2024 | Publicado: 07/03/2024

Vanderson Urbaiti Gimenez

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9084-7780>
Universidade de Sorocaba, Brasil
E-mail: vanderson.gimenez@uniso.br

Jacira Lima da Graça

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6811-6307>
Universidade de Sorocaba, Brasil
E-mail: jacira.graca@prof.uniso.br

Maria Aparecida Lopes da Costa

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5808-0831>
Universidade de Sorocaba, Brasil
E-mail: maria.costa@prof.uniso.br

Dawilson Menna Junior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4066-3581>
Fundação Dom Aguirre, Brasil
E-mail: dawilson.menna@fda.com.br

José Martins de Oliveira Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6435-1908>
Universidade de Sorocaba, Brasil
E-mail: jose.oliveira@prof.uniso.br

Valquíria Miwa Hanai-Yoshida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2022-4485>
Universidade de Sorocaba, Brasil
E-mail: valquiria.yoshida@prof.uniso.br

Resumo

O objetivo desta investigação foi desenvolver e executar um projeto, em escala piloto, de um pátio de compostagem de resíduos sólidos orgânicos. Para tanto, três tipos de leiras de compostagem ($n=3$) — especificamente, sem impermeabilização de solo e com impermeabilização com lona ou alvenaria — foram construídas e resíduos sólidos domiciliares úmidos (RSDU) e resíduos públicos (RPU) foram nelas dispostos. Os dados obtidos para a umidade, nitrogênio e carbono orgânico total (COT) foram de $48\pm 3\%$ e $89\pm 3\%$; $1,01\pm 0,05\%$ e $0,93\pm 0,04\%$; e $52,8\pm 0,5\%$ e $45,3\pm 4,7\%$ para RSDU e RPU, respectivamente. Os valores da temperatura central nas pilhas foram semelhantes nos diferentes tempos de amostragem. Um pátio piloto de compostagem foi implantado na Universidade de Sorocaba, comprovando a viabilidade de dar destinação adequada a parte dos resíduos sólidos gerados no Campus. Apesar do tempo e da temperatura de compostagem serem semelhantes nos três tipos de leiras, as leiras com estrutura em alvenaria apresentaram vantagem quanto à captação de biofertilizante líquido. Na manutenção do teor de umidade nas leiras, a rega com água foi desnecessária devido às temperaturas do processo de compostagem promoverem a liberação da água dos resíduos. Na prática, estabelecer a periodicidade da aeração das leiras mostrou-se essencial na promoção do processo de compostagem. Além disso, observou-se que mesmo a baixa frequência das trocas realizadas para manter a oxigenação do meio foi suficiente para manter a temperatura e a umidade ideais para a microbiota até a fase de maturação do composto.

Palavras-chave: Compostagem; Resíduos sólidos; Política nacional do meio ambiente.

Abstract

This investigation aimed to develop and execute a pilot-scale project for an organic solid waste composting yard. To this end, three types of composting windrows ($n=3$) — specifically, without soil waterproofing and with waterproofing with canvas or masonry — were constructed, and wet household solid waste (RSDU) and public waste (RPU) were disposed of in them. The humidity, nitrogen, and TOC data were $48\pm 3\%$ and $89\pm 3\%$; $1.01\pm 0.05\%$ and $0.93\pm 0.04\%$ and $45.3\pm 4.7\%$ and $52.84\pm 0.04\%$ for RSDU and RPU, respectively. The core temperature values in the

stacks were similar at different sampling times. A pilot composting yard was implemented at the University of Sorocaba, proving the feasibility of adequately disposing of part of the solid waste generated on the Campus. Despite the composting time and temperature being similar in the three types of windrows, windrows with a masonry structure showed an advantage in capturing liquid biofertilizer. In maintaining the moisture content in the windrows, irrigation with water was unnecessary due to the temperatures of the composting process, promoting the release of water from the waste. Establishing the periodicity of windrow aeration proved essential in promoting the composting process. Furthermore, it was observed that even the low frequency of changes carried out to maintain the oxygenation of the medium was sufficient to maintain the ideal temperature and humidity for the microbiota until the compost maturation phase.

Keywords: Composting; Solid waste; National environmental policy.

Resumen

El objetivo de esta investigación fue desarrollar y ejecutar un proyecto a escala piloto de un patio de compostaje de residuos sólidos orgánicos. Para ello, se construyeron tres tipos de hileras de compostaje ($n=3$), específicamente, sin impermeabilización de suelo y con impermeabilización con lona o mampostería, y en ellas se depositaron residuos sólidos domésticos húmedos (RSDU) y residuos públicos (RPU). Los datos obtenidos para humedad, nitrógeno y TOC fueron $48\pm 3\%$ y $89\pm 3\%$; $1,01\pm 0,05\%$ y $0,93\pm 0,04\%$; y $52,8\pm 0,5\%$ y $45,3\pm 4,7\%$ para RSDU y RPU, respectivamente. Los valores de temperatura central en las chimeneas fueron similares en diferentes momentos de muestreo. En la Universidad de Sorocaba se implementó un patio piloto de compostaje, demostrando la factibilidad de disponer adecuadamente parte de los residuos sólidos generados en el Campus. Aunque el tiempo y la temperatura de compostaje fueron similares en los tres tipos de hileras, las de mampostería mostraron ventaja en cuanto a captura de biofertilizante líquido. Para mantener la humedad en las hileras, el riego con agua fue innecesario porque las temperaturas del proceso de compostaje promueven la liberación de agua de los desechos. En la práctica, establecer la periodicidad de la aireación de las hileras resultó esencial para promover el proceso de compostaje. Además, se observó que incluso la baja frecuencia de cambios realizados para mantener la oxigenación del medio fue suficiente para mantener la temperatura y humedad ideales para el microbiota hasta la fase de maduración del compost.

Palabras clave: Compostaje; Residuos sólidos; Política ambiental nacional.

1. Introdução

A gestão de resíduos é pautada na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (IBAMA, 2022). No Brasil, de acordo com a PNRS, os lixões deveriam ter sido extintos para dar lugar a aterros sanitários. Os rejeitos dos resíduos sólidos urbanos (RSU) somente deveriam ser dispostos em aterros quando estes não apresentarem potencial de reutilização, o que inclui a logística reversa e a reciclagem de quase todos os materiais (Bonjardim et al., 2018, p. 315). Uma das justificativas seria porque os resíduos sólidos (RS) orgânicos de origem agrícola, animal, urbano, agroindustrial ou industrial podem ser transformados em fertilizantes (Araújo et al., 2020), sendo que o descarte inadequado dos RS orgânicos ocasiona problemas sanitários e ambientais, gerando a proliferação de parasitas e de vetores de doenças que, por conseguinte, aumentam a contaminação de corpos d'água e emissão de gases poluentes (Heck et al., 2013).

Os RSU foram classificados na Lei Nº 12.305/2010 (Brasil, 2010) em função da sua origem, quantidade de umidade e recuperabilidade, em resíduos domiciliares (RDO) e resíduos públicos (RPU). Em nosso trabalho os RS em estudo foram classificados, de acordo com os preceitos da Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), como resíduo sólido domiciliar úmido (RSDU) e RPU.

A compostagem é um processo natural referente à degradação da matéria orgânica, entretanto atualmente o termo é utilizado para manejo do RS orgânico com a utilização de técnicas desenvolvidas para acelerar a decomposição e produzir compostos orgânicos de interesse à sociedade (Crivelaro et al., 2018, p. 91).

A hipótese da presente pesquisa foi que a implementação de um pátio de compostagem na Universidade de Sorocaba (Uniso) é viável, técnica e economicamente, para dar destino adequado à parte dos resíduos sólidos gerados no Câmpus Cidade Universitária Prof. Aldo Vannucchi. Diante disto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um projeto-piloto operacional de pátio de compostagem de RS orgânicos para a Uniso, identificando as fontes de RS orgânicos (RSDU e RPU); adaptando uma metodologia para compostagem de RS orgânicos; determinando indicadores de desempenho da compostagem; e, por fim, fazendo uma análise de custo do projeto.

2. Metodologia

Para a coleta do RSDU, foram utilizados dois contêineres de 200 L cada, e definido a coleta de apenas 100 L diariamente das segundas as sextas-feiras para facilitar o transporte e deposição dos resíduos nas leiras de compostagem.

Três tipos de leiras de compostagem (n=3) foram construídas para a produção de amostras, seguindo os parâmetros estabelecidos pela equipe de pesquisa e mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características das leiras de compostagem para o ensaio.

Parâmetros	Desenho do experimento		
	1 a 3	4 a 6	7 a 9
Dimensão (m ²)	2	2	2
Impermeabilização do solo	Não	Lona plástica	Estrutura em alvenaria com drenagem por gravidade
Coleta de biofertilizante líquido (chorume)	Não	Não	Sim
Cobertura	Não	Lona plástica	Lona plástica
Disposição	Diretamente no solo	Sobre a lona plástica	Sobre a estrutura

Fonte: Elaboração própria.

Um berço com gravetos com 0,3 m de altura foi feito para a disposição dos resíduos orgânicos (RSDU e RPU) nas leiras, para facilitar a entrada de O₂ no material a passar pelo processo de compostagem. Após a criação deste berço foram dispostos uma cama de RPU com 0,3 m de altura por toda a leira, totalizando 1,2 m³ (1200 L) de material, e inserido 0,2 m³ de RSDU. Este processo foi realizado até as leiras atingirem 1,5 m de altura, com exceção do berço de gravetos que foi realizado apenas no início do trabalho para facilitar a oxigenação das leiras.

O teor de umidade (%) (n=3) foi calculada utilizando-se a Equação 1 como o auxílio de uma balança de precisão analítica (SHIMADZU, ATX224).

$$\text{Umidade} = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

onde, m_i representa a massa inicial e m_f a massa final.

Para a determinação do teor de nitrogênio utilizou-se a metodologia proposta por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). E, para a determinação do teor de COT, os materiais foram secos a 105 °C em estufa com circulação e renovação de ar (Marconi, MAO35/S, Brasil), colocados em cadinho previamente pesados em balança analítica (Tecnal, M214A, Brasil), e levados à mufla (QUIMIS, D21, Brasil), devidamente pesados e mantidos a uma temperatura de 580 °C durante um período de 2 h. Após resfriamento em dessecadores, o material foi pesado em balança analítica com precisão de 0,0001 g, obtendo-se por diferença o conteúdo de COT, conforme metodologia de Cunha-Queda et al. (2003). Nesta etapa da pesquisa o grupo teve a colaboração da Ph.D. Maria Aparecida Lopes da Costa.

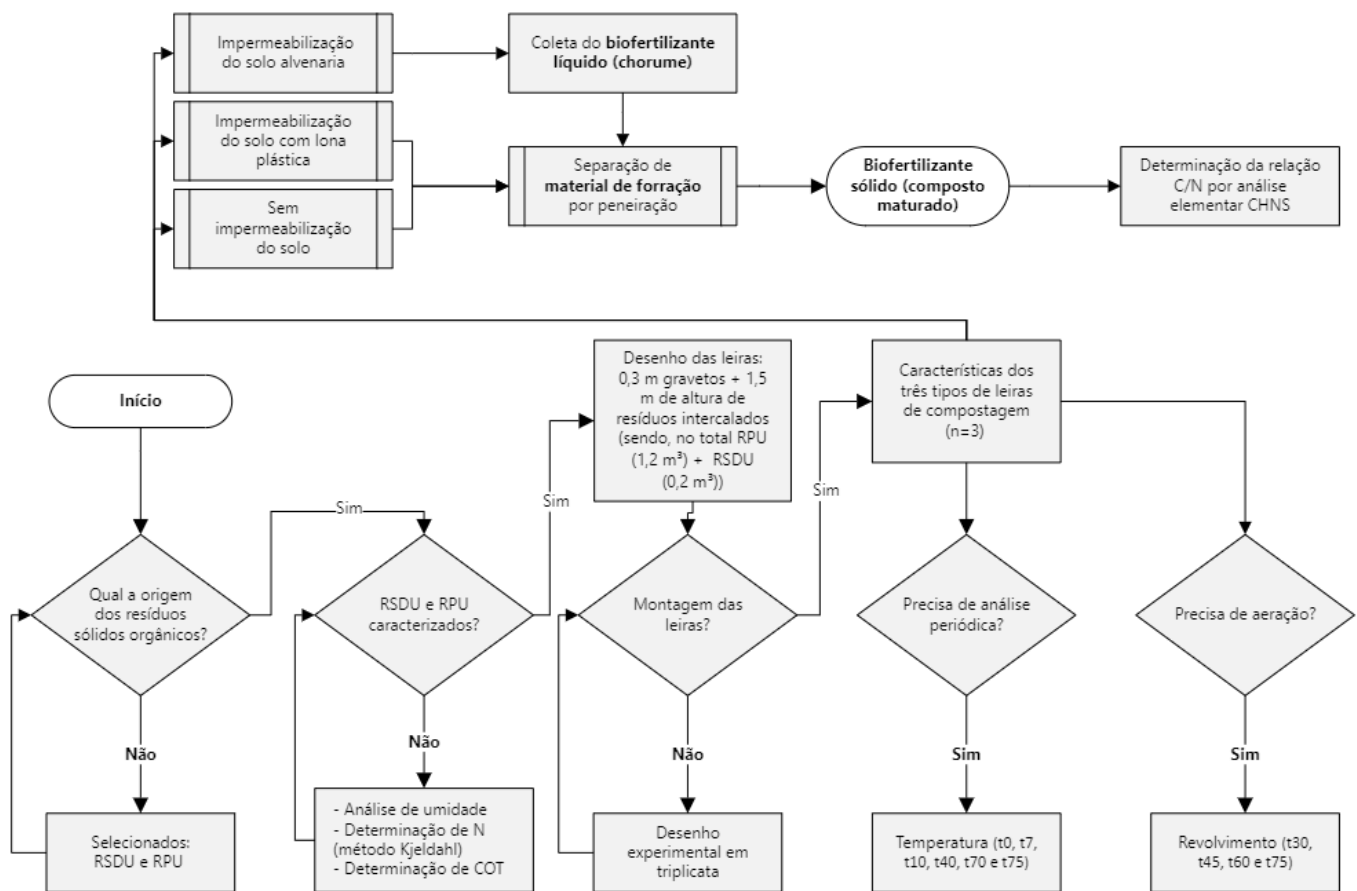
A análise elementar CHNS é uma técnica de análise química qualitativa e quantitativa dos elementos Carbono (C), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N) e Enxofre (S) em uma amostra, sendo realizada geralmente para materiais orgânicos. No analisador elementar (ThermoScientific®, FlashSmart, EUA), disponível na CAQI-IQSC-USP (análise tercerizada pela nossa equipe), foi utilizado o método de calibração externa tendo como padrões de calibração a metionina, 2,5-Bis(5-terc-butilbenzoxazol-2-il)tiofeno (BBOT), sulfanilamida e cistina. Uma massa conhecida da amostra é acondicionada em um porta-amostra de estanho e este sistema é inserido em um tubo de reação aquecido (950 °C); o interior do tubo é preenchido com reagentes que criam uma zona de oxidação (CuO) e outra de redução (Cu eletrolítico). A alta temperatura promove a oxidação

(combustão) do estanho do porta-amostra; esta, por sua vez, é uma reação altamente exotérmica que libera uma quantidade extra de calor ao sistema, gerando um aumento substancial da temperatura local (cerca de 1700 °C) onde se encontra a amostra, promovendo a total degradação da mesma. Neste processo, todo o C presente na amostra se transforma em gás carbônico (CO₂); todo o H se transforma em água (H₂O); todo o N se transforma em gás nitrogênio (N₂); e todo o S se transforma em dióxido de enxofre (SO₂). Estes gases gerados no processo de “queima” da amostra são direcionados para uma coluna de cromatografia gasosa e são separados; a detecção das suas quantidades é feita no fim da coluna por um detector de condutividade térmica (TCD). Em seguida, os sinais da amostra são comparados com os da curva analítica para determinar as concentrações em porcentagem de C, H, N e S presentes na amostra.

A determinação da temperatura foi realizada em intervalos de tempo iguais para os três tipos de leiras produzidas. A temperatura foi observada no centro de cada leira. As análises foram realizadas utilizando um termômetro de mercúrio em t₀, t₇, t₁₀, t₄₀, t₇₀ e t₇₅, onde t representa tempo e o numeral os dias após o início da construção de cada leira.

Na Figura 1 é mostrado o fluxograma do processo da implementação do pátio de compostagem piloto para visualização da metodologia aplicada ao processo de compostagem.

Figura 1 - Fluxograma do processo da implementação do pátio de compostagem piloto.



Legenda: resíduo sólido domiciliar úmido (RSDU) e resíduo público (RPU). Fonte: Elaboração própria.

3. Resultados e Discussão

Uma pesquisa documental sobre a geração de resíduos na Uniso foi feita junto ao setor de Suprimentos, assim identificou-se que nas aulas práticas dos cursos de Engenharia de Alimentos e Gastronomia e no Restaurante Universitário Famille são gerados RSDU. O resíduo proveniente de poda e jardinagem da área do Câmpus da Uniso foi denominado de resíduo público (RPU). Atualmente, a administração da Uniso contrata serviço terceirizado de coleta e transporte de todo o

volume de resíduos sólidos dos RSDU e RPU, por meio de caçambas. Sendo que, o destino desses resíduos é o aterro sanitário municipal.

Na gestão dos resíduos, somente a implantação das PNRS não é o suficiente, faz-se necessário maior engajamento para sua consumação surtir efeito na eliminação de impactos negativos no ambiente e na saúde da população (Almeida et al., 2022). A destinação sensata dos resíduos sólidos, tanto urbanos quanto industriais, deve ser fundamentada, para que em primeiro lugar não seja descartado de forma inadequada e como consequência impedindo a contaminação do meio ambiente e em segundo, a possibilidade de se criar renda com a reciclagem do material (Almeida et al., 2022). Assim, segregar os resíduos RSDU e RPU gerados na Uniso para posterior compostagem corrobora com o meio ambiente, minimiza os custos para descarte e pode até gerar renda.

A compostagem é um método eficaz de reaproveitamento da matéria orgânica que gera adubo orgânico como produto final. Uma das formas mais indicadas para lidar com a parte orgânica dos resíduos sólidos urbanos no Brasil é a compostagem, mas essa metodologia ainda tem pouca adesão no país (Morais et al., 2022).

As nove leiras de compostagem foram construídas para o ensaio como proposto (Tabela 1). Na Figura 2 são mostradas imagens das leiras 7, 8 e 9 (construção das composteiras em alvenaria) no pátio piloto de compostagem da Uniso, equipadas com sistema de drenagem por gravidade.

Os valores de umidade (%) obtidos para material bruto ($n = 3$) de RPU e RSDU foram de $48 \pm 3 \%$ e $89 \pm 3 \%$, respectivamente, e sua determinação se deu anteriormente ao processo de compostagem. Como a proporção utilizada de RPU:RSDU foi de 1,2:0,2 m³, estimou-se que no tempo zero do experimento as leiras apresentavam um teor de umidade de 54 %. Assim justificando a ausência de moscas e roedores, pois como preconizado por Pereira Neto (2007), valores de umidade acima de 60 % tornariam o meio anaeróbico, gerando gases malcheirosos e atraindo vetores indesejáveis.

No presente trabalho não foram realizadas correções de umidade e o composto maturado foi obtido em cerca de 80 dias, apesar da literatura trazer que níveis muito baixos de umidade (abaixo de 30 %) inibem a atividade microbiana e um meio muito úmido, (acima de 65 %) causa condições de anaerobiose e lixiviação de nutrientes, tornando a decomposição lenta (Crivelaro et al., 2018). Segundo a Diretriz Técnica N° 007/2021 - Dirtec para Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos (2021, p. 16) o teor de umidade deve ser mantido entre 40 e 60 %, sendo o ideal 55 % de umidade.

A concentração de nitrogênio (%), determinada pelo método de Kjeldahl, ($n=3$) foi estudada anteriormente ao processo de compostagem e os valores resultantes foram de $1,01 \pm 0,05 \%$ e $0,93 \pm 0,04 \%$ de nitrogênio para RSDU e RPU, respectivamente. Sendo que, RSDU foi constituído por resíduos derivados de frutas, verduras e legumes e RPU derivado da grama do tipo esmeralda, folhas e pequenos galhos de árvores. Estes valores assemelham-se aos obtidos no trabalho de Ismael et al. (2013), no qual os valores de nitrogênio total para cascas de frutas e verduras foram de 0,67%, cascas de banana foi de 0,52 % e 1,14 % para grama.

Figura 2 - Etapas da construção das leiras de compostagem 7, 8 e 9 equipadas com sistema de drenagem por gravidade



(a) Preparo do terreno



(b) Instalação da tubulação



(c) Preparo das leiras para receber o concreto usinado



(d) Leiras concretadas



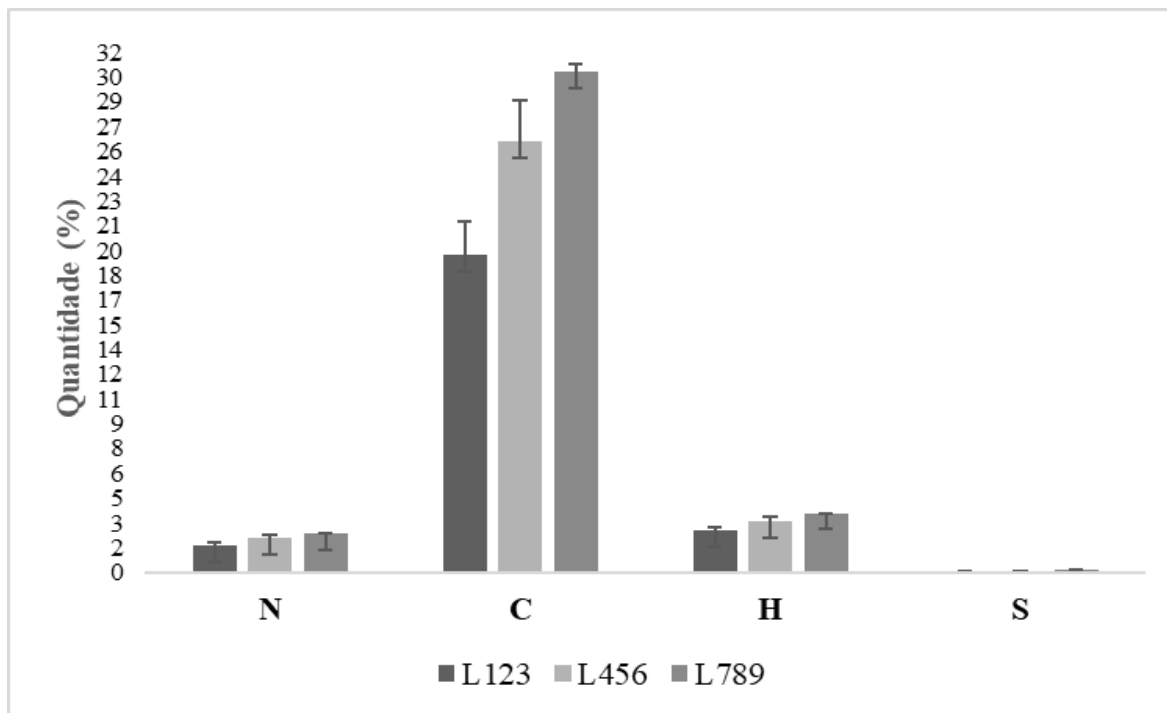
(e) Vista norte/sul das composteiras com dimensão 2 m² (n=3)

Fotografia: Vanderson Urbaiti Gimenez.

A determinação de COT das amostras RSDU e RPU, feita em triplicata, resultou $52,8 \pm 0,5 \%$ e $45,3 \pm 4,7 \%$, respectivamente. Sendo que, no trabalho de Carmo & Silva (2012, p. 1218), os teores de COT nos resíduos orgânicos de 42 amostras de compostos, esterco, resíduos vegetais, lodos de esgoto e camas de frango e de suíno, variaram de 8,5 a 51,4 %. Além disso, os valores obtidos por outro estudo com casca de pinus, casca de café, fibra de coco e serragem (Ismael et al., 2013, p. 1214) são próximos aos obtidos em nossa pesquisa, provavelmente por ambos os trabalhos terem amostras de origem vegetal.

Em relação aos ensaios realizados nos biofertilizantes sólidos (compostos maturados) para a determinação quantitativa dos elementos químicos C, H, N e S, foi utilizado a técnica análise elementar CHNS, realizada na Central de Análises Químicas Instrumentais (CAQI) no Instituto de Química de São Carlos - Universidade de São Paulo (USP), no Laboratório de Ressonância Magnética Nuclear, os resultados CHNS são apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Dados CHNS por leira (n=6) ao final do processo de compostagem.



Nota: As amostras foram analisadas aleatoriamente e em triplicata. Fonte: Elaboração própria.

Para que se estabeleça um processo de compensação eficiente, a relação ótima inicial de C/N no material a ser compostado é de 25-30/1 e a relação C/N no composto final obtido é de 10-20/1, segundo Naime (2012). De acordo com Melo (2016), os valores ideais para a relação C/N comumente estão na faixa de 30:1 para a compostagem ser eficiente, valores inferiores a essa proporção impactam na abundância de nitrogênio. Desta forma, a reprodução dos microrganismos pode ser mantida, assim como as funções metabólicas dos organismos, além da possibilidade de obtenção do composto final em menos tempo, evitando mau cheiro. Segundo este autor, quando o composto atinge o estado de maturação, passa a ter uma relação C/N entre 18-20/1 e uma temperatura próxima a do ambiente.

As concentrações da relação C/N obtidas no final do processo de compostagem pela nossa equipe foram de 11,4/1, 12,4/1 e 12,7/1 para as leiras de 1 a 3, leiras de 4 a 6 e leiras de 7 a 9, respectivamente (Gráfico 1). Assim ficando abaixo dos valores obtidos por Melo (2016), porém corroborando com os achados de Gorgati e Lucas Júnior (2001), onde os microrganismos que realizam a fermentação absorvem C e N idealmente na proporção de 30:1, com 2/3 do C sendo eliminados na forma de CO₂, ficando 1/3 imobilizado no protoplasma celular, resultando uma relação C/N igual a 10/1.

Em outras palavras, para a compostagem, estimar a quantidade de C e N nos resíduos utilizados, define a relação C/N. Sendo que os microrganismos utilizam 30 partes de C para cada parte de N, por isso a mistura inicial ideal tem relação C/N de 30/1. Porém, nem todo C é aproveitado, pois 10 partes viram biomassa e 20 partes são liberadas como CO₂. Assim, a relação C/N final cai para 10/1. Uma sugestão seria misturar material com relação C/N alto e baixo.

De acordo com os valores obtidos, os biofertilizantes sólidos a partir das leiras 7, 8 e 9 ($2,4 \pm 0,1$ % de N) apresentaram valores de N maior que os dos biofertilizantes sólidos a partir das leiras 1-3 ($1,7 \pm 0,1$ % de N) e 4-6 ($2,1 \pm 0,1$

% de N). Provavelmente, isto pode ter sido causado pelos revolvimentos das leiras, pois as lonas plásticas foram perfuradas e rasgadas, havendo contaminação do composto com material das lonas plásticas e, conseqüentemente, contato com o solo (sendo assim, as leiras de 4 a 6 se assemelharam as leiras de 1 a 3), tendo também perda do biofertilizante líquido (chorume) que carreou parte do teor de N. Esta condição também foi evidenciada por Pedrosa et al. (2013) nas leiras montadas em solo exposto.

As leiras construídas de alvenaria, além de proporcionar melhores rendimentos atendem à Portaria N° 52/2021 (Brasil, 2021), que estabeleceu o regulamento técnico para os sistemas orgânicos de produção e as listas de substâncias e práticas para o uso nos sistemas orgânicos de produção, que traz no Art. 6° que o projeto, a implantação e a operação das instalações de armazenamento e manejo de dejetos, abrangendo as áreas de compostagem, devem seguir critérios que evitem a poluição das águas subterrâneas e superficiais, do solo, bem como a proliferação e a propagação de pragas, vetores de doenças e de agentes patogênicos que possam estar presentes nos dejetos.

Para a validação do biofertilizante sólido (composto) se utiliza a Instrução Normativa (IN) n° 25/2009, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (Brasil, 2009), que definiu regras para as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos de diferentes tipos voltados para a agricultura. Na Tabela 2 são apresentadas as especificações dos fertilizantes orgânicos mistos e compostos, definidos pela IN n° 25.

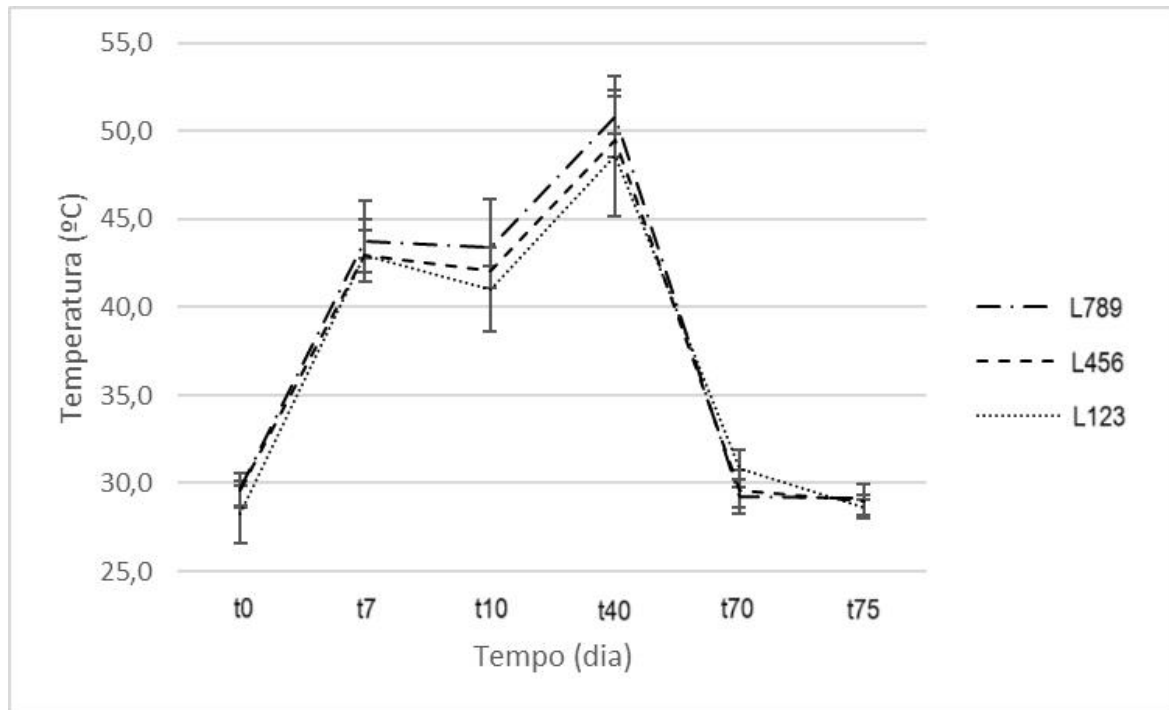
Tabela 2 - Especificações para fertilizantes mistos e compostos.

Garantia	Misto ou composto			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Umidade (máxima)	50 %	50 %	50 %	50 %
Nitrogênio total (mínimo)	0,5 %	0,5 %	0,5 %	0,5 %
Carbono orgânico (mínimo)	15 %	15 %	15 %	15 %
Valor de pH (mínimo)	6,0	6,0	6,5	6,0
Relação C/N (máxima)	20/1	20/1	20/1	20/1

Fonte: IN25/2009 do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2009).

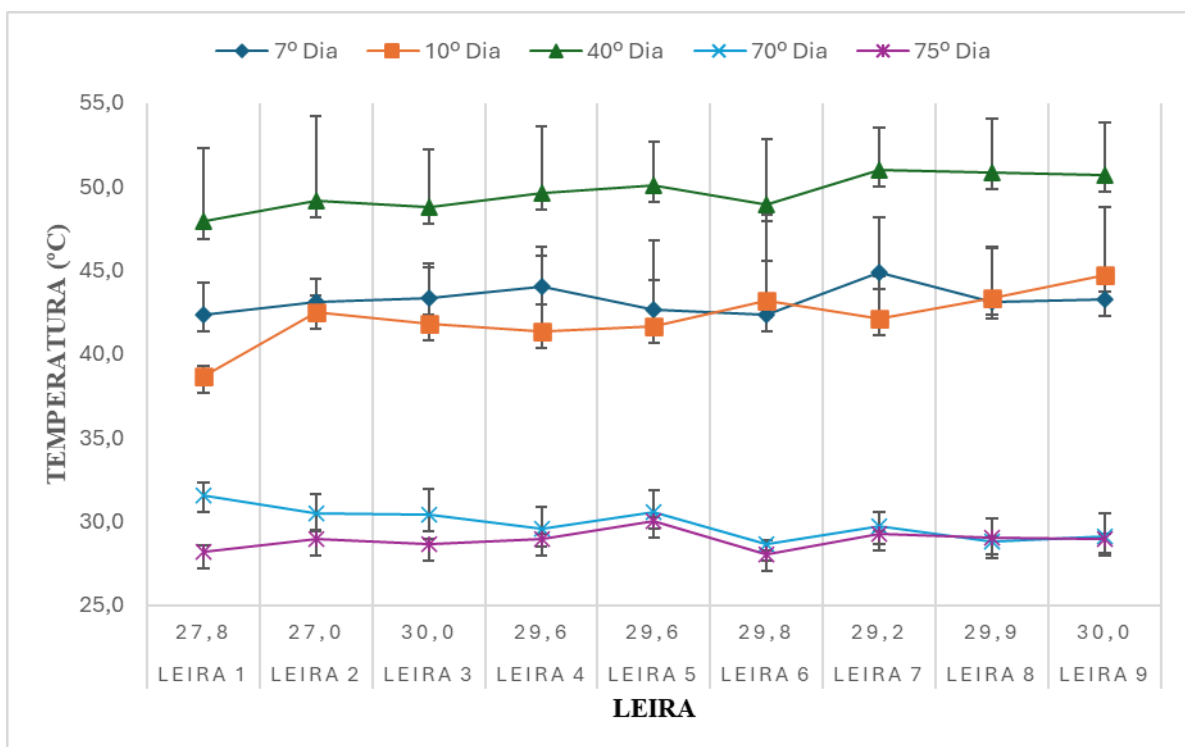
Pode ser observado no Gráfico 2 que os dados de temperaturas obtidos foram semelhantes para as leiras de 1 a 9 nos diferentes tempos (t_0 , t_7 , t_{10} , t_{40} , t_{70} e t_{75}), considerando-se os valores médios e seus respectivos desvios-padrão. Ainda, variaram regularmente em todas as leiras nos diferentes tempos de amostragem (Gráfico 3), corroborando com os valores da literatura (Brasil. MMA, 2018, p. 26).

Gráfico 2 - Temperatura das leiras (n=6) em diferentes tempos.



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 3 - Dados de temperatura (°C) das leiras 1 a 9 (n=3) em diferentes tempos de amostragem.



Fonte: Elaboração própria.

Em nossa investigação, na compostagem dos RSDU e RPU em leiras estáticas aeradas impermeabilizadas por alvenaria, a evolução no controle da temperatura de centro teve início em $29,7 \pm 0,9$ °C em média, após o 40º dia de monitoramento de cada composteira a média obtida foi de $50,9 \pm 2,3$ °C e após 75º dia a média de temperatura obtida foi de $29,1 \pm 0,2$ °C. Segundo Souza et al. (2020), a fase mesófila é caracterizada como a fase inicial da compostagem com valores de

temperatura que atingem até 40 °C, assim se tomarmos este valor como referência para a fase mesófila da compostagem, no presente estudo esta fase foi atingida antes do t_{10} (Gráfico 3).

Azevedo & Vilela (2019) consideram que a fase ativa de degradação é realizada em valores de temperatura entre 45 e 65 °C, onde a eliminação de patógenos no processo de compostagem é realizada na fase termofílica ou fase da degradação. Esta fase foi observada em torno do quadragésimo dia (t_{40}) em nossa investigação. Divergindo dos dados do MPE-PR, p. (2011, p. 2), que relataram a fase mesófila em 60 a 75 dias.

A literatura traz que a fase de humificação se dá no intervalo da temperatura diminui para 25 – 30 °C (Brasil, 2009, p. 8), assim esta etapa ocorreu em nosso trabalho próximo ao t_{70} . Nesta fase, foi observado o composto com aspecto próximo a de terra vegetal e a presença de minhocas, corroborando com o descrito em literatura (Brasil. MMA, 2018), porém num tempo próximo a t_{75} , sendo que foi descrito sobre a obtenção do húmus entre 90 e 120 dias (Brasil. MMA, 2018, p. 28). Esta diferença, provavelmente, pode estar relacionada à frequência de revolvimentos das leiras, que influenciam a temperatura, teor de umidade, consequentemente, o tempo de compostagem. Os valores de temperatura observados foram de 51 °C, 52,7 °C, 51,2 °C, 52,4 °C, 51,9 °C, 51,7 °C, 52,8 °C, 53,1 °C e 52,9 °C nas leiras de 1 a 9, respectivamente, no 40º dia após o início de construção de cada leira, finalizando a fase termófila.

Os resultados apresentados anteriormente divergem do trabalho de Oliveira (2015), que apresentou dados de temperaturas (n=5) entre 66,7°C em 48 dias, 66,8 °C em 55 dias, 60,7 °C em 26 dias, 60,3 °C em 31 dias e 68,8 °C em 11 dias, finalizando a fase termófila no 55º dia, com aeração duas vezes por semana no primeiro mês do processo e uma vez por semana nos meses posteriores com a adição de rega e controle da umidade com a utilização de água, sendo o parâmetro ajustado em 60 %, aproximadamente. Como discutido anteriormente, a diferença de tempo de finalização da fase termófila pode estar relacionada com a metodologia utilizada no controle da aeração. No presente trabalho, o primeiro revolvimento das leiras foi realizado 30 dias após o início do processo de compostagem e uma vez a cada 15 dias para os meses posteriores, sem a adição de rega com água e controle da umidade.

Acredita-se que o O₂ existente nas leiras era suficiente para o trabalho da microbiota que, liberando energia em forma de calor, aqueceu os resíduos fazendo com que houvesse liberação de água destes, resultado do controle da umidade pela própria população de microrganismos presente. Diante da técnica utilizada, o tempo para a obtenção do composto foi de aproximadamente 80 dias.

A impermeabilização do solo promovida pela construção em alvenaria (leiras 7, 8 e 9 desta pesquisa) permitiu a obtenção de três tipos de produto, nomeadamente, biofertilizante líquido (chorume), biofertilizante sólido (composto) e material para forração (cobertura). Portanto, tendo uma vantagem em relação às leiras com material de compostagem depositado diretamente sobre o solo. Divergindo de Inácio & Miller (2009), que consideram que a prática de impermeabilização do solo deve ser evitada, alegando que isso influencia na boa aeração das leiras devido a produção do chorume. Uma explicação razoável para esta divergência constatada seria que as leiras 7, 8 e 9 foram construídas possibilitando a drenagem do biofertilizante líquido (chorume) por sistema de drenagem por gravidade, assim não prejudicando a aeração do sistema. Porém, um estudo mais aprofundado para o escalonamento desta prática se faz necessário.

Elias & Oziel (2014) estudaram as leiras estáticas aeradas, nas quais a mescla de resíduos é depositada sobre uma rede de tubos perfurados que força a entrada de ar (aeração forçada). A técnica de aeração forçada pode promover a retirada em excesso da umidade corroborando com a diminuição da temperatura das leiras, consequentemente aumentando o tempo na obtenção de composto (do início das atividades até a utilização final do produto o processo ocorreu entre 6 e 7 meses). Em nossa pesquisa, uma cama de gravetos formou a base das leiras para melhor aeração destas, acreditamos que este seria um dos fatores que acelerou a obtenção de produtos de compostagem (cerca de 80 dias de processo).

O custo para construção de três composteiras, em alvenaria com capacidade para 1,2 m³ de resíduos sólidos orgânicos, foi de R\$ 1565,00 (Tabela 3).

Tabela 3 - Insumos utilizados para a construções das composteiras 7, 8 e 9 e respectivos custos.

Item	Material	Quantidade	Valor unitário (R\$) *	Subtotal (R\$)
1	Bloco vedação cerâmico 0,14m x 0,19m x 0,29m	100 un	2,01	201,00
02	Canaleta cerâmica 0,14m x 0,19m x 0,29m	100 un	2,99	299,00
03	Barras de aço 8mm	2 un	70,92	141,84
04	Tela soldada Q61 (0,15m x 0,15m x 0,034m, com dimensão 2m x 3m)	2 un	86,29	172,58
05	Cimento CAUE CP II – F32	6 un	37,10	222,60
06	Areia grossa	0,5 m ³	166,67	166,67
07	Brita 1	0,5 m ³	166,67	166,67
08	Barra de tubo PVC marrom de 32 mm	1 un	74,41	74,41
09	Cotovelo PVC marrom 32x 90°	3 un	4,83	14,49
10	Adaptador PVC marrom 32x ½”	3 un	3,56	10,68
11	Torneira ½" esfera	3 un	27,96	83,88
12	Cola PVC para tubo 15 g	1 un	11,18	11,18
13	Cadeado	3 un		
Total				1565,00

Dado: * valores cotados em 01/04/2022. Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 4 é exibido o custo para execução da compostagem por três meses no Pátio Piloto da Uniso. A elaboração da análise de custo foi feita em parceria com a professora mestra Jacira Lima da Graça.

Tabela 4 - Custo de compostagem para uma leira, do início até o final da produção do biofertilizante sólido, referente a três meses de processo.

Especificação	Valor (R\$) *
Insumos	11,07
Mão-de-obra	159,81
Profissional especializado	1.032,87
Equipamentos de proteção	50,70
Gastos com veículo	6,03
Depreciação ativos	32,39
Total	1.292,87

Dado: * valores cotados em 01/12/2023. Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a análise de custos encontrada na Tabela 4, onde foram considerados os insumos utilizados para produção das leiras, as mãos de obras, os equipamentos de proteção individual, gastos com veículo para o transporte dos resíduos e a depreciação dos ativos, o pátio piloto de compostagem se mostra viável, uma vez que após o início deste presente trabalho não foram adquiridos, através de compra, os adubos químicos anteriormente utilizados para a adubação dos plantios e jardins da Uniso - Câmpus Professor Aldo Vannucchi. Assim como, houve diminuição dos números de caçambas e transporte para os resíduos gerados no local, sendo que em três meses foram 64.800 L (64,8 m³) de resíduos destinados ao processo de compostagem que equivalem a 54 caçambas de 1,2 m³ cada.

O presente trabalho aponta através das investigações realizadas para a economia visada, a redução de gastos e um pequeno passo para a resolução dos problemas ambientais, tais como, poluição do solo, água e diminuição da vida útil dos aterros sanitários em consequência dos descartes inadequados de resíduos ora estudados.

4. Conclusão

Um pátio de compostagem piloto foi implementado na Uniso (SP-Brasil), provando a viabilidade técnica e econômica de dar destino adequado à parte dos resíduos sólidos gerados no Câmpus Cidade Universitária Prof. Aldo Vannucchi. Apesar do tempo e temperaturas de compostagem serem semelhantes entre os três diferentes tipos de leiras (especificamente, sem impermeabilização de solo e com impermeabilização utilizando lona ou alvenaria), as leiras com estrutura em alvenaria apresentaram vantagem em relação a captação do biofertilizante líquido (chorume). A compostagem de resíduo sólido orgânico pôde gerar três produtos — nomeadamente, biofertilizante sólido, biofertilizante líquido e matéria para forração — nas leiras de compostagem construídas em alvenaria com sistema de drenagem. Para a compostagem, é preciso saber a relação nitrogênio (N)/carbono (C) dos resíduos utilizados, pois isso define o processo em si. A mistura ideal dos resíduos sólidos tem relação C/N de 30/1 inicial, sendo uma sugestão é misturar materiais com C/N alto e baixo. O produto deve apresentar uma relação C/N de 10/1 ao final do processo de compostagem. Cientificamente, foi interessante confrontar os resultados das análises de temperatura com a abundante literatura disponível. Porém, após estabelecido o processo de compostagem não se faz necessário o seu monitoramento, devido a própria microbiota presente na massa regular este parâmetro tornando o meio sustentável. Na manutenção do teor de umidade nas leiras, não foi necessária a rega com água devido as elevadas temperaturas observadas no processo de compostagem promoverem energia em forma de calor, fazendo com que os resíduos utilizados no processo liberem a água presente no material submetido à compostagem. Na prática, o estabelecimento da periodicidade da aeração das leiras se mostrou como um fator importante para promover o processo de compostagem. Ainda, foi observado que mesmo a baixa frequência dos revolvimentos realizados para a manutenção da oxigenação do meio foi suficiente para manter a temperatura e umidade ideal para a microbiota até a fase de maturação do composto. O presente trabalho aponta através das investigações realizadas para a economia visada, a redução de gastos e um pequeno passo para a resolução dos problemas ambientais.

Agradecimentos

À Fundação Dom Aguirre pela bolsa integral de mestrado; ao Programa de Pós-graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba – Uniso pela oportunidade de formação em pesquisa científica; à Uniso pelo espaço físico autorizado para execução deste projeto; e ao Prof. Me. Ricardo Nery de Castro pela contribuição acadêmica enriquecendo este trabalho.

Referências

- Almeida, R. S. de, Marques, A. T., Gadelha, H. S., Castro Filho, H. M., Maia, A. G., Santos, S. A. dos, Medeiros, R. F. de, & Silva, M. M. F. (2022). Desenvolvimento Sustentável no Brasil e o desafio da implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Research, Society and Development*, 11(2), e39211225446. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25446>
- Araújo, C. C. de O., Cerqueira, G. S., & Carneiro, C. E. A. (2020). Prospecção tecnológica para processos de compostagem de resíduos orgânicos. *Cadernos de Prospecção*, 13(4), 1177–1187. <https://doi.org/10.9771/cp.v13i4.33021>
- Azevedo, M. A., & Vilela, N. M. S. (2019). Avaliação da eficiência dos processos de compostagem por reviramento e aeração forçada no tratamento de resíduos sólidos orgânicos. *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental e 30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, III104_1-III104_7.
- Bonjardim, E. C., Pereira, R. D. S., & Guardabasso, E. V. (2018). Análise bibliométrica das publicações em quatro eventos científicos sobre gestão de resíduos sólidos urbanos a partir da Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei nº 12.305/2010. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 46. <https://doi.org/10.5380/dma.v46i0.53722>
- Brasil, Pub. L. No. 25, D.O.U. (2009).

- Brasil, Pub. L. No. Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010, Diário Oficial da União (DOU) 3 (2010). https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm Brasil, Pub. L. No. 52, D.O.U. (2021).
- Brasil. MMA. (2018). *Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos: manual de orientação* (Ministério do Meio Ambiente, Centro de Estudos e Promoção da Agricultura de Grupo, & Serviço Social do Comércio, Orgs.). Ministério do Meio Ambiente (MMA). www.mma.gov.br
- Carmo, D. L. do, & Silva, C. A. (2012). Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(4), 1211–1220. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000400015>
- Crivelaro, A. L. R., Moreira, M. A. C., & Silva, J. A. F. (2018). Gestão de resíduos sólidos e compostagem orgânica: Estudo de caso para escolha de tecnologia de processo em Macaé, Brasil. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, 12(1), 89–110. <https://doi.org/10.19180/2177-4560.v12n12018p89-110>
- Diretriz Técnica N° 007/2021 - Dirtec - Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos, Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler - RS (Fepam) 1 (2021). <http://www.fepam.rs.gov.br/licenciamento/area4/17.asp>
- Elias, M., & Oziel, V. (2014). *Transferência tecnológica do projeto de coleta seletiva e compostagem de resíduos orgânicos da UFSC para a UFGD* [Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Universidade Federal de Santa Catarina]. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/131771>
- Gorgati, C. Q., & Lucas Júnior, J. (2001). Compostagem da fração orgânica de lixo urbano do município de São Lourenço da Serra- SP: rendimento da produção de composto durante a estação de inverno. *Energia na Agricultura*, 16(2), 63–69.
- Heck, K., Marco, E. G., Hahna, .B. B., Kluge, M., Spilki, F. R., & Van der Sand, S. T. (2013). Evaluation of degradation temperature of compounds in a composting process and microbiological quality of the compost. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17, 54–59.
- IBAMA. (2022, junho 22). *Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - Lei nº 12.305/2010*. Ministério do Meio Ambiente. <http://www.ibama.gov.br/residuos/controle-de-residuos/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs>
- Inácio, C. T., & Miller, P. R. M. (2009). *Compostagem: ciência e prática para gestão de resíduos orgânicos* (1º ed, Vol. 1). Embrapa Solos. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/663578/compostagem-ciencia-e-pratica-para-a-gestao-de-residuos-organicos>
- Ismael, L. L., Pereira, R. A., Farias, C. A. S., & Farias, E. T. R. (2013). Evaluation of composting bins for small-scale recycling of organic wastes. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 8(4), 28–39. <http://revista.gvaa.com.br>
- Malavolta, E., Vitti, G. C., & Oliveira, S. A. de. (1997). *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações* (Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Org.; 2º ed). POTAFOS.
- Melo, S. L. (2016). Análise do uso de compostagem doméstica em conjuntos habitacionais de interesse social na cidade de São Domingos – Bahia. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, 4(2), 169–180. <https://doi.org/10.9771/gesta.v4i2.14395>
- Morais, C. A. S., Fiore, F. A., & Esposito, E. (2022). Influence of the use of acclimatized inoculum in the composting process. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27(3), 499–510. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210015>
- MPE-PR. (2011). *Nota técnica: Compostagem de resíduos sólidos urbanos*. Centro de apoio operacional às promotorias de proteção ao meio ambiente; Ministério Público do Estado do Paraná. https://www.mpma.mp.br/arquivos/ESMP/Nota_Tecnica_-_Compostagem.pdf
- Naime, R. (2012, maio 17). *Resíduos de podas e limpeza urbana*. EcoDebate. <https://www.ecodebate.com.br/2012/05/17/residuos-de-podas-e-limpeza-urbana-artigo-de-roberto-naime/>
- Oliveira, P. D. C. (2015). *Compostagem de resíduos agroindustriais em leiras com diferentes fontes de carbono* [Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)]. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Pedrosa, T. D., Farias, C. A. S., Pereira, R. A., & Farias, E. T. R. (2013). Monitoramento dos Parâmetros Físico-Químicos na Compostagem de Resíduos Agroindustriais. *Nativa*, 1(1), 44–48. <https://doi.org/10.14583/2318-7670.v01n01a08>
- Pereira Neto, J. T. (2007). *Manual de Compostagem* (Vol. 1). Editora UFV.
- SNIS. (2022). *Diagnóstico Temático: Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - Infraestrutura* (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS, Org.; SET/2022, Vol. 1). Ministério do Desenvolvimento Regional - Secretaria Nacional de Saneamento. <http://www.snis.gov.br/diagnosticos>
- Souza, L. A., Carmo, D. F., Silva, F. C., & Paiva, W. M. L. (2020). Análise dos principais parâmetros que influenciam a compostagem de resíduos sólidos urbanos. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 8(3), 194–212.