

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CAMPUS LONDRINA

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ISABELLA ZANATTA GARCIA

**COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DA INDÚSTRIA
SUCROENERGÉTICA: INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO C/N INICIAL E DA ADIÇÃO DE
VINHAÇA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2021

ISABELLA ZANATTA GARCIA

**COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DA INDÚSTRIA
SUCROENERGÉTICA: INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO C/N INICIAL E DA ADIÇÃO DE
VINHAÇA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

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

Co-orientador: Prof. Dr. Roger Nabeyama Michels

LONDRINA

2021



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



ISABELLA ZANATTA GARCIA

**COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS ORGÂNICOS DA INDÚSTRIA
SUCROENERGÉTICA: INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO C/N INICIAL E DA ADIÇÃO DE
VINHAÇA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 17/ dezembro/ 2021.

Marcelo Hidemassa Anami
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Maico Chiarelto
Mestrado
Universidade Federal do Oeste da Bahia

Tatiane Cristina Dal Bosco
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Primeira agradeço a Deus por estar presente em todos os momentos e guiando em meus passos e escolhas.

Agradeço à minha família pelo incentivo e apoio desde o início da graduação. E por entenderem minha ausência e ficarem na torcida por mim.

Agradeço ao meu namorado Matheus por estar sempre ao meu lado, superar minhas dificuldades e fazer com que os momentos de desespero ficassem mais leves. Por me fazer crescer e dividir os momentos bons e ruins comigo.

Agradeço às minhas amigas de graduação, por crescerem comigo e tornarem os meus dias dentro da universidade mais divertidos e menos pesados.

Agradeço à Fátima do Sul Agro-Energética por fornecer os resíduos e colaborar com os transportes necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também a todos que direta ou indiretamente contribuíram com a logística e execução deste trabalho: aos funcionários Esmério, Fernando, Júlio (Maquita), Vinícius, Cláudio e Igor. Em especial ao Bica e a esposa Nalva, que cederam o espaço para a realização do experimento.

Agradeço ao Guilherme, estudante de Engenharia Mecânica, e ao meu coorientador Roger Nabeyama Michels que me ajudaram na inserção dos sensores de monitoramento de temperatura utilizados nas leiras de compostagem, pelas análises estatísticas e pela orientação.

Agradeço aos Professores Marcelo Hidemassa Anami e Maico Chiarelto pelas preciosas contribuições na concepção e fechamento deste trabalho e por aceitarem fazer parte da banca, mesmo diante dos prazos exíguos.

Por fim, agradeço a minha orientadora Prof^a. Dra. Tatiane Cristina Dal Bosco, que me orientou desde o primeiro estágio da minha vida profissional, pela paciência, confiança, conselhos e por ser sempre exigente, pensando no meu progresso e sendo fundamental para a minha vida profissional e pessoal.

RESUMO

GARCIA, Isabella Zanatta. **Compostagem de resíduos orgânicos da indústria sucroenergética: Influência da relação C/N inicial e da adição de vinhaça**. 2021. 87 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental). – Curso de Engenharia Ambiental – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2021.

A partir da criação do Proálcool, em 1975, como estratégia para diminuir a crise brasileira ocasionada pela alta do petróleo, surgiram as indústrias sucroenergéticas no Brasil e, com elas, grande quantidade de resíduos industriais. A torta de filtro, o bagaço da cana-de-açúcar e a cinza de caldeira são os resíduos comumente gerados neste setor e o efluente do processo, a vinhaça, tem destaque devido à sua elevada carga orgânica, podendo ser prejudicial ao meio ambiente se descartada incorretamente. Tais resíduos possuem potencial para tratamento via compostagem, visto que podem resultar em benefícios para as lavouras, devido às propriedades do composto, e ganho econômico para a empresa geradora, em virtude da redução dos custos com questões logísticas de movimentação de resíduos. No entanto, pouco se sabe a respeito da melhor composição das leiras para que o processo de compostagem seja eficiente. Neste sentido, o objetivo do presente estudo foi avaliar a eficiência de duas relações C/N iniciais, 30:1, considerada ideal segundo a literatura, e 44:1, considerada ideal do ponto de vista prático, levando em consideração a particularidade da indústria em estudo. Além disso, buscou-se avaliar a influência da vinhaça, utilizando-a nas regas das leiras, em comparação à água. Para tanto, foram montadas quatro leiras de relação C/N 30:1 e quatro leiras de relação C/N de 44:1, e o volume total de cada leira foi de 300 litros. Duas leiras de cada relação C/N foram fertirrigadas com vinhaça e duas irrigadas com água, no momento dos revolvimentos. Monitorou-se: temperatura, redução de massa e volume, aspecto do material e fez-se a caracterização química do composto final. A temperatura das leiras dos tratamentos com relação C/N inicial 30:1 demorou mais tempo para atingir a máxima, sendo um dia depois das leiras de relação C/N inicial de 44:1, porém, os tratamentos T1 e T2 (relação C/N inicial 44:1 irrigados com vinhaça e água, respectivamente) permaneceram por mais tempo com temperaturas mais elevadas que os tratamentos T3 e T4 (relação C/N inicial 30:1 irrigados com vinhaça e água, respectivamente). A maior redução em massa úmida (51,5%) e em volume (72%) foi a do tratamento T2, o que do ponto de vista prático o torna um tratamento interessante para aplicação em larga escala. O pH de todos os tratamentos se apresentaram alcalinos (entre 7 e 7,5) ao final da compostagem e houve a descaracterização dos resíduos. Quanto à caracterização final dos compostos obtidos, a relação C/N teve redução de 50,15% a 62,40%, sendo observado maior percentual para os tratamentos com maior C/N inicial (44:1) e, em relação à forma de irrigação, as leiras irrigadas com vinhaça apresentaram maior porcentagem de redução em relação às leiras irrigadas com água. Nenhum dos tratamentos atingiu todos os parâmetros necessários para classificação como “Fertilizante Orgânico Composto”, fazendo-se necessária a correção de alguns elementos.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar, Composto orgânico, Resíduos sólidos agroindustriais, Tratamento biológico.

ABSTRACT

GARCIA, Isabella Zanatta. **Composting of organic waste from the sugarcane industry: Influence of the initial C/N ratio and the addition of vinasse**. 2021. 87 p. Course Conclusion work (Bachelor of Environmental Engineering). - Environmental Engineering Graduation, Federal Technological University of Parana (UTFPR). Londrina, 2021.

From the creation of Proálcool, in 1975, as a strategy to reduce the Brazilian crisis caused by the high oil prices, sugar-energy industries emerged in Brazil and, with them, a large amount of industrial waste. Filter cake, sugarcane bagasse and ash are the waste commonly generated in this sector and the process effluent, vinasse, stands out due to its high organic load, which can be harmful to the environment if disposed of incorrectly. Such residues have potential for treatment via composting, as they can result in benefits for crops, due to the properties of the compost, and economic gain for the generating company, due to the reduction of costs with logistical issues related to the handling of residues. However, little is known about the best composition of windrows for the composting process to be efficient. In this sense, the aim of this study was to evaluate the efficiency of two initial C/N ratios, 30:1, considered ideal according to the literature, and 44:1, considered ideal from a practical point of view, taking into account the particularity of the industry. In addition, this study aimed to evaluate the influence of vinasse, using it in the irrigation of windrows, in comparison with water. For this purpose, four windrows with a C/N ratio of 30:1 and four windrows with a C/N ratio of 44:1 were set up, and the total volume of each windrow was 300 liters. Two windrows of each C/N ratio were fertigated with vinasse and two irrigated with water, at the time of turning. It was monitored: temperature, reduction of mass and volume, material appearance and chemical characterization of the final compost. The temperature of the swaths of the treatments with an initial C/N ratio of 30:1 took longer to reach the maximum, being one day after the swaths with an initial C/N ratio of 44:1, however, the treatments T1 and T2 (ratio C /initial N 44:1 irrigated with vinasse and water, respectively) remained longer at higher temperatures than treatments T3 and T4 (initial C/N ratio 30:1 irrigated with vinasse and water, respectively). The greatest reduction in wet mass (51.5%) and in volume (72%) was that of the T2 treatment, which from a practical point of view makes it an interesting treatment for large-scale application. The pH of all treatments was alkaline (between 7 and 7.5) at the end of composting, which indicates the possibility of using the compost to buffer the soil. As for the final characterization of the compounds obtained, none of the treatments reached the parameters necessary for classification as "Compound Organic Fertilizer" without a correction.

Key-words: Sugarcane, Organic compost, Agro-industrial solid waste, Biological treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases da compostagem.....	28
Figura 2 - Mapa de localização da Usina onde foi realizado o projeto.	37
Figura 3 - Diagrama das etapas do projeto.....	38
Figura 4 - Fluxograma do processo de produção de etanol e geração de resíduos.....	39
Figura 5 - Dimensionamento das leiras.....	46
Figura 6 - Disposição das camadas e seus volumes de uma leira de compostagem da relação C/N inicial de 30:1	47
Figura 7 - Disposição das camadas e seus volumes de uma leira de compostagem da relação C/N inicial de 44:1.....	47
Figura 8 - Sensor utilizado para coleta de dados de temperatura.....	49
Figura 9 - Sensores de monitoramento de temperatura em leiras de compostagem	50
Figura 10 – Gráfico das temperaturas médias dos tratamentos.....	53
Figura 11 - Rampa de aquecimento dos tratamentos	54
Figura 12 - Gráfico das temperaturas máximas dos tratamentos ao longo do processo de compostagem.....	55
Figura 13 - Gráfico das temperaturas mínimas de cada tratamento ao longo do processo	58
Figura 14 – Comportamento dos tratamentos após o revolvimento de maior pico de temperatura.....	60
Figura 15 - Temperatura ao longo do dia, em cada leira, no dia de maior temperatura.	62
Figura 16 - Temperatura ao longo do 60º dia de compostagem.	63
Figura 17 - Registros fotográficos de cada resíduo antes do processo de compostagem.	72
Figura 18 - Registro fotográfico das leiras depois do primeiro revolvimento	72
Figura 19 - Leiras apresentando diferentes tipos de fungos.	73
Figura 20 - Registros fotográficos dos compostos ao final da compostagem.	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos resíduos provenientes da indústria de etanol.	19
Quadro 2 - Datas e quantidade de líquido inserido em cada revolvimento.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da Torta de Filtro.....	21
Tabela 2 - Composição química do bagaço da cana-de-açúcar (continua).	22
Tabela 3 - Composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar reportadas na literatura (resultados em % mássica e base seca) (continua).	23
Tabela 4 - Composição química da vinhaça em kg m ³	24
Tabela 5 - Caracterização inicial dos resíduos.....	41
Tabela 6 - Caracterização inicial da vinhaça.	42
Tabela 7 - Quantidades utilizadas para o cálculo das leiras de relação C/N inicial 30:1.	45
Tabela 8 - Quantidades utilizadas para o cálculo das leiras de relação C/N inicial 44:1.	45
Tabela 9 - Metodologias utilizadas para as análises do composto final.	51
Tabela 10 - Tempo e temperaturas exigidas para possível sanitização do composto conforme a literatura.	56
Tabela 11 - Temperaturas máximas atingidas e seus respectivos dias para cada tratamento.	57
Tabela 12 - N total, Carbono orgânico e relação C/N nos compostos finais segundo os tratamentos.	64
Tabela 13 - Valores de pH e Condutividade Elétrica para os tratamentos	66
Tabela 14 - Resultados da caracterização do composto final de cada tratamento.	68
Tabela 15 - Redução de massa úmida, massa seca e volume.	69
Tabela 16 - Resultado do Teste de Scott-Knott para perda de massa úmida (%) e redução de volume (%) entre os tratamentos com água e vinhaça.....	70
Tabela 17 - Teste de Scott-Knott para Perda de Massa (%) e Redução de Volume (%) nos tratamentos com relação C/N 30:1 e 44:1.	71

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1 Contexto da cana-de-açúcar no Brasil.....	15
3.2 Evolução da proteção ambiental no setor sucroenergético e os resíduos sólidos do processo de produção de álcool	16
3.2.1 Torta de Filtro.....	20
3.2.2 Bagaço de cana-de-açúcar	22
3.2.3 Cinza de bagaço da cana-de-açúcar	23
3.2.4. Vinhaça	24
3.3 COMPOSTAGEM	25
3.3.1 Fatores que influenciam a compostagem	26
3.3.1.1 Temperatura.....	26
3.3.1.2 Relação C/N.....	29
3.3.1.3 pH	30
3.3.1.4 Microrganismos.....	31
3.3.1.5 Aeração.....	33
3.3.1.6 Umidade.....	34
3.3.1.7 Granulometria	35
3.4 Compostagem de resíduos da indústria sucroenergética	35
4 MATERIAL E MÉTODOS	37
4.1 Caracterização do local do estudo	37
4.2 Resíduos utilizados	38
4.3 Dimensionamento e montagem das leiras	42
4.4 Monitoramento das leiras e análise do composto	48
4.5 Análise dos resultados	52

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1 Temperatura	53
5.2 Carbono, Nitrogênio e Relação C/N final do composto.....	64
5.3 pH e Condutividade Elétrica.....	65
5.4 Caracterização química dos compostos ao final do processo e seu enquadramento segundo a legislação	67
5.5 Redução de Massa e Volume	69
5.6 Aspecto e descaracterização do material	71
6 CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Em 1973, no primeiro choque do petróleo, o governo brasileiro passou a buscar alternativas viáveis que substituíssem o consumo do combustível fóssil no país para, assim, reduzir sua dependência e amenizar o efeito da crise na economia brasileira. O Proálcool – Programa Nacional do Álcool – lançado em 1975, e sustentado por subsídios e financiamentos públicos, teve o intuito de introduzir o álcool anidro de cana-de-açúcar, produzido em destilarias incorporadas a usinas, à gasolina. Em 1979, o Proálcool foi expandido para a produção de álcool com a função de substituir a gasolina, sendo priorizada a produção de etanol hidratado (MICHELLON; SANTOS; RODRIGUES, 2008).

O desenvolvimento desta atividade resulta em impactos positivos para a economia e no âmbito social, tendo em vista a quantidade de empregos gerada. Todavia, a indústria sucroenergética pode causar impactos ao meio ambiente (FERREIRA *et al.*, 2016). As causas estão presentes em todos os processos industriais da fabricação do etanol, ou seja, desde a entrada da matéria prima até o produto final (REBELATO; MADALENO; RODRIGUES, 2014). No seu processo industrial há emissões atmosféricas, geração de efluentes líquidos, como a vinhaça, e a geração de grandes quantidades de resíduos sólidos, como o bagaço da cana-de-açúcar, a torta de filtro e a cinza, que precisam ser adequadamente gerenciados, de modo que se evite ou se minimize o impacto ambiental da atividade (BORRERO, 2003).

Diante deste cenário, visando à sustentabilidade industrial, surge a Economia Circular, que consiste na utilização desses resíduos inevitáveis do processo, transformando-os e reutilizando-os dentro do processo produtivo. Assim, os resíduos passam a ser encarados como subprodutos ou como recursos e evita-se a extração de certas matérias primas para os processos industriais (CIRCULAR, 2017).

Segundo a CONAB (2020) estima-se que apenas de torta de filtro sejam geradas 26 milhões de toneladas por ano no país. Tais resíduos têm potencial para tratamento via compostagem devido à sua alta carga orgânica (BERNARDINO *et al.*, 2016) e o composto orgânico obtido pode ser reutilizado no próprio processo de produção da cana-de-açúcar. Segundo Kiehl (2002) a compostagem acontece pela ação de microrganismos existentes nos próprios resíduos, transformando-os em uma matéria orgânica mais

humificada, rica em nutrientes, podendo ser utilizada no solo como forma de adubação (ROCHA, 2009).

Outro resíduo bastante desafiador na indústria sucroenergética, em função dos grandes volumes e da carga orgânica, é a vinhaça, que, na maior parte dos casos, é utilizada para fertirrigação das lavouras de cana (SANTA CRUZ *et al.*, 2013). Sabe-se que na compostagem o controle da umidade do material deve ser realizado periodicamente, de modo a garantir as condições ideais para o desenvolvimento dos microrganismos (INÁCIO; MILER, 2009). Pouco se sabe, entretanto, sobre a associação do processo de compostagem dos resíduos tipicamente gerados na indústria sucroenergética (torta de filtro, bagaço da cana-de-açúcar e cinzas de caldeira) com a vinhaça, para fins de umidificação do material e incremento de nutrientes.

O presente trabalho foi realizado numa indústria produtora de álcool, localizada no Mato Grosso do Sul, e estima-se que em 2020 foram geradas 52.664,06 toneladas de torta de filtro e 129.539,06 toneladas de bagaço na safra de 2020/21. Apenas uma pequena parcela de bagaço da cana-de-açúcar foi reaproveitada para a queima em caldeira e geração de energia. Já a torta de filtro foi 100% utilizada em áreas destinadas à plantação de cana-de-açúcar como fonte de nutrientes para a cultura.

Porém, por falta de uma área de armazenamento na planta industrial, o transporte de tais resíduos precisa ser imediato para as áreas de plantio, aumentando o deslocamento e a quantidade de caminhões para o seu transporte, implicando em custos para o negócio e um complexo sistema logístico para a movimentação e distribuição destas cargas.

Neste sentido, considerando o potencial de geração de resíduos da indústria em questão e a necessidade de diminuir as viagens de caminhões realizadas desde a área de transbordo dos resíduos até a lavoura, foi sugerido o presente projeto. A compostagem, além de resultar num composto mais estabilizado e rico em nutrientes, o que pode diminuir o consumo de fertilizantes químicos no cultivo da cana, pode resultar na diminuição do volume do material a ser destinado, contribuindo com a viabilidade do negócio e a sustentabilidade ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência de diferentes relações C/N iniciais e da adição de vinhaça na compostagem dos subprodutos resultantes do processo produtivo do etanol, como a torta de filtro, o bagaço da cana-de-açúcar e a cinza de caldeira.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o desempenho de duas relações C/N iniciais no processo de compostagem de torta de filtro, bagaço de cana-de-açúcar e cinza de caldeira, em termos de temperatura, redução de massa, volume e aspectos agronômicos do produto final, com vistas à utilização em grande escala no tratamento dos resíduos gerados pela indústria de álcool.

- Verificar se a umidificação das leiras de compostagem com vinhaça favorece o processo de compostagem, no que se refere à temperatura, redução de volume, redução de massa e aspectos agronômicos do produto final, em comparação à umidificação com água.

- Realizar a caracterização agronômica do composto ao final do processo, de modo a verificar seu enquadramento na legislação em vigor para aplicação no solo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Contexto da cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar vem sendo cultivada no Brasil desde o período Colonial e, hoje, apresenta uma maior importância para a economia brasileira. Nos primeiros séculos, essa cultura se destinava apenas à produção comercial de açúcar em larga escala, mas hoje, são pelo menos três produtos industriais derivados da cana-de-açúcar: o álcool etílico (etanol hidratado e anidro), o açúcar e a bioenergia (destinada a alimentar as próprias usinas fabricantes e a venda de energia para cidades). A estrutura desses três importantes produtos, desde a produção inicial até a venda para o consumidor final, é denominada de “setor sucroenergético” (MICHELLON *et al.*, 2008).

Em busca de reduzir a dependência brasileira do petróleo vindo de fora do país e suprir o crescimento da demanda por combustíveis renováveis, surgiu, em 1975, o Programa Nacional do Álcool - Próalcool, um programa baseado em subsídios e financiamentos pelo governo federal (REGAZZINI; BACHA, 2012), dividido em quatro fases. A primeira fase, de 1975 a 1979, se deu pela produção de álcool anidro para ser misturado à gasolina. Em seguida, houve estímulos para a substituição da gasolina pelo álcool e isenções fiscais pelo governo, a fim de adquirir veículos movidos a etanol (DE ANDRADE *et al.*, 2009).

Em virtude da estabilização do preço do petróleo e da alta do preço do açúcar, nos anos 1980, houve a retirada dos financiamentos e subsídios do governo por questões financeiras. Isso foi prejudicial ao Programa e agravou a crise de abastecimento em 1989. No final da década de 90, empresários do setor sucroenergético se uniram e criaram associações, e, em 2003, alavancaram o Programa novamente, com o lançamento de veículos movidos a álcool e à gasolina, ou seja, os carros “*flex*”. O sucesso deste Programa se deu em virtude da alta no preço do petróleo e do aumento da demanda externa advinda da conscientização ambiental, refletida pelo Protocolo de Kyoto (MICHELLON *et al.*, 2008).

Atualmente, estão em funcionamento 422 usinas de cana-de-açúcar em todo o país, dedicadas à produção do etanol hidratado, etanol anidro, açúcar e/ou co-geração

de energia (NOVA CANA, 2021). Destas, 23 usinas estão no Estado do Mato Grosso do Sul e são responsáveis pela moagem de 48.803.899 toneladas de cana-de-açúcar no ano/safra de 2020/2021 (BIOSUL, 2021).

Estima-se que em todo país, 8.449,8 mil hectares são destinados ao cultivo da cana-de-açúcar. Já para a região Centro-Oeste a estimativa é de 1.811,9 mil hectares, uma porcentagem de 21,5% de todo o território nacional (CONAB, 2020).

Segundo o diagnóstico do setor sucroenergético realizado pelo Instituto de Economia Agrícola do Estado de São Paulo, no ano de 2014, o setor movimentou R\$ 70 bilhões com a produção de cana-de-açúcar fabricando etanol, açúcar e bioeletricidade. Com isso, representou 1,3% do Produto Interno Bruto (PIB) do país e foi responsável por gerar 4,5 milhões de empregos direta ou indiretamente (RAMOS; NACHILUK, 2014).

3.2 Evolução da proteção ambiental no setor sucroenergético e os resíduos sólidos do processo de produção de álcool

O Brasil foi o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e, na Safra 2020/21, 654,5 milhões de toneladas foram destinadas à produção de 41,2 milhões de toneladas de açúcar e 29,7 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2021). Com isso, o crescimento do setor canavieiro fez com que houvesse uma maior discussão sobre a problemática social e ambiental onde as indústrias já estavam instaladas. Neste sentido, a preocupação com os problemas socioambientais aumenta à medida em que o setor entra em expansão (JORDÃO; MORETTO, 2015).

A problemática se instala derivando-se de várias fases da atividade. Destaca-se a fase da prática de queimada da cana antes do corte, causando a poluição do ar, a degradação do solo, a poluição das águas, o uso de agrotóxicos e fertilizantes, a pressão sobre outras culturas e áreas de florestas nativas, com a destruição das reservas legais e de áreas de preservação permanente (COELHO *et al.*, 2007; NOEL, 2007). Tal fase foi superada, em alguns estados, como São Paulo, com a publicação da Lei nº 11.241/2002 que “dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlata”.

No processo produtivo tem-se a geração de resíduos como a torta de filtro e a cinza das caldeiras, o subproduto bagaço e o efluente vinhaça. Inicia-se, portanto, uma nova preocupação para o setor sucroenergético e os órgãos ambientais fiscalizadores: o potencial poluidor desses resíduos no meio ambiente e, conseqüentemente, à saúde humana (DIAS, 2011).

Quando a produção de álcool começou a aumentar consideravelmente, a partir da década de 1970, a quantidade de resíduos gerada representou um desafio para as indústrias que, mais tarde, precisaram se adequar para realizar o descarte corretamente (KOMATSU *et al.*, 2019). É o caso, por exemplo, da vinhaça, um líquido residual resultante da destilação do licor da fermentação do álcool da cana-de-açúcar (SALOMOM, 2009). Salomom (2009) destaca que para a produção de cada litro de etanol, pode-se gerar até 18 litros de vinhaça. Foi então que algumas áreas da lavoura de cana passaram a ser destinadas para a aplicação deste efluente. Com esta prática, a vinhaça passou a ser vista como um subproduto, considerando a possibilidade de sua reutilização como biofertilizante para diversas culturas, dentre elas, a própria cana-de-açúcar (GEMTOS; CHOULIARAS; MARAKIS, 1999). Além disso, passou-se a evitar o despejo em rios próximos às indústrias, caso este, recorrente na década de 1944 (SPADOTTO; RIBEIRO, 2006).

Na década de 1990, a vinhaça passou a ser fundamental para o aumento da produtividade da lavoura, mas não era necessário a utilização de todo seu volume. Assim, o restante produzido era colocado em áreas de despejo, podendo causar impactos ambientais e desperdícios na sua distribuição (SPADOTTO; RIBEIRO, 2006).

Para os outros resíduos gerados, a evolução ocorreu de forma mais simplificada: a torta de filtro passou a fazer parte da adubação de plantio de canaviais, em alguns casos encorpadas às cinzas de caldeira e fuligem dos sistemas de filtração dos gases emitidos para a atmosfera (SANTOS *et al.*, 2011). A torta de filtro consiste no resíduo originado da mistura do bagaço moído da cana e do lodo da decantação, proveniente do tratamento e da clarificação do caldo da cana-de-açúcar (CORTEZ *et al.*, 1992).

O bagaço, por sua vez, passou a ser utilizado no processo de queima de caldeira, dando maior importância para este resíduo, já que em poucos dias de moagem, as

indústrias e suas instalações conseguem sua autonomia em termos de energia (SPADOTTO; RIBEIRO, 2006).

Informações mais antigas, datadas do início dos anos 2000, referem-se a despejos de efluentes em rios próximos às usinas, sem um controle tão rigoroso, já que a geração dos resíduos era pequena, quando comparada aos volumes produzidos hoje (SPADOTTO; RIBEIRO, 2006).

O desenvolvimento de estudos para minimizar os impactos ocasionados por indústrias sucroenergéticas tem sido cada vez mais importante, haja visto o agravamento das questões voltadas ao meio ambiente e a intensificação das discussões relacionadas à sustentabilidade, além da necessidade do correto gerenciamento dos resíduos sólidos e líquidos derivados dos processos industriais, para a sua viabilidade e autorização para funcionamento (FERREIRA; THOMAZ; REBELATO, 2016).

A importância e a complexidade da gestão ambiental diante desses resíduos oriundos da fabricação de álcool e açúcar deve ser considerada como uma das maiores mudanças que as indústrias sucroenergéticas vem sofrendo nos últimos anos. É notável o desenvolvimento de uma série de ajustes pelos pátios industriais e o planejamento de estruturas, sistemas e atividades de cada empresa, para que se possa obter uma postura holística considerando a variável ambiental (JABBOUR; JABBOUR; SARKIS, 2014).

Para a realização do correto planejamento do gerenciamento dos resíduos é preciso classificar os resíduos sólidos e os efluentes gerados no processo produtivo da indústria. Em seguida, são definidas as etapas, que se iniciam na coleta e no armazenamento da matéria-prima, até a destinação final ambientalmente adequada de cada resíduo.

No Brasil, a classificação dos resíduos sólidos, segundo a sua periculosidade, fica por conta da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da Norma Brasileira Regulamentadora NBR 10.004 de 2004 (ABNT, 2004a). Esta norma classifica resíduos sólidos conforme a “identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes e características, e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido”.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004a) classifica os resíduos conforme a sua periculosidade, ou seja, o risco que conferem à saúde e ao meio ambiente. Os resíduos podem, portanto, ser classificados como de Classe I - Perigosos, quando possuem uma ou mais das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade. Tal definição foi atualizada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei n. 12.305 (BRASIL, 2010), art. 13, que acrescentou as características de carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade.

Já os resíduos Classe II são os resíduos não perigosos, e apresentam duas subclasses: IIA – não inertes, que possuem atributos como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, ou seja, quando as concentrações de determinados parâmetros, no ensaio de solubilidade, ultrapassam os padrões de potabilidade da água; IIB – inertes, que são resíduos que ao serem colocados em contato com a água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não apresentam nenhum dos seus componentes solubilizados a concentrações acima dos padrões estabelecidos para a potabilidade da água, excetuando-se aspectos como: cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004a).

No Quadro 1 apresenta-se a classificação dos resíduos sólidos da indústria de produção de etanol, conforme a sua periculosidade.

Quadro 1 - Classificação dos resíduos provenientes da indústria de etanol.

Resíduos	Classificação
Torta de Filtro	Classe II A - Não Inerte
Bagaço de cana-de-açúcar	Classe II A - Não Inerte
Cinza de caldeira	Classe II A - Não Inerte

Fonte: Autoria Própria (2021).

Em 2010 foi publicada a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), na Lei nº 12.305, a qual contribui para as questões voltadas à gestão de resíduos sólidos e à preservação ambiental no Brasil. Tal lei institui, dentre outros aspectos, a redução da geração de resíduos, o aumento da reciclagem e a reutilização e a destinação ambientalmente adequada por parte dos geradores (BRASIL, 2010). A PNRS também

reconhece o valor econômico do resíduo, que passa a se tornar algo com utilidade e até mesmo rentável para as empresas.

Geradores de resíduos sólidos perigosos, de construção civil, serviços de saúde, resíduos públicos de saneamento básico, agrossilvopastoris, resíduos de empresas de transportes, resíduos industriais e resíduos de mineração necessitam de um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), que orienta e planeja toda a destinação dos resíduos gerados pelas empresas.

Além disso, especificamente ao setor produtivo, estabelece-se como princípio e objetivo da PNRS, no Art. 6, inciso V, a ecoeficiência:

Mediante a compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada do planeta (BRASIL, 2010).

3.2.1 Torta de Filtro

A torta de filtro consiste em todo o lodo produzido na etapa de clarificação do caldo da cana, que passa por um processo de filtração a vácuo. O precipitado formado é composto por resíduos solúveis e insolúveis (FRAVET *et al.*, 2010). É adicionado, neste processo uma quantidade de hidróxido de cálcio, responsável pela floculação de colóides orgânicos; a mistura, então é encaminhada para o processo de decantação e resulta em um caldo límpido e em uma borra formada por compostos orgânicos e inorgânicos que foram insolubilizados (GOMES *et al.*, 2018).

No Brasil, gera-se de 30 a 44 kg deste resíduo por tonelada de cana moída e sua importância vem do percentual de matéria orgânica e de nutrientes essenciais às plantas, que podem substituir parte dos fertilizantes minerais utilizados na agricultura (NUNES JÚNIOR, 2008; SANTOS *et al.*, 2011).

De acordo com Bernardino *et al.* (2016) a umidade da torta de filtro é de aproximadamente 54,57% e ela pode conter, 85,1% de matéria orgânica, sendo 11% de lignina, 34% de hemicelulose e 38% de celulose e o restante é constituído por minerais como Fósforo (P), Nitrogênio (N), Cálcio (Ca), além de significativos teores de Potássio

(K), Magnésio (Mg), Enxofre (S), micronutrientes como: Ferro (Fe), Manganês (Mg), Zinco (Zn) e Cobre (Cu) e baixas concentrações de metais pesados como: Cromo (Cr), Cádmio (Cd) e Chumbo (Pb). Na Tabela 1 apresenta-se a composição química da torta de filtro.

Tabela 1 - Composição química da Torta de Filtro.

Composição	Chacón <i>et al.</i> (2011)	Lima <i>et al.</i> (2009)
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	715,8	n.a
C (g kg ⁻¹)	358,9	277,7
N (g kg ⁻¹)	17,3	18,7
S (g kg ⁻¹)	3,4	3,5
P (g kg ⁻¹)	19,1	9,6
Mg (g kg ⁻¹)	1,0	4,7
K (g kg ⁻¹)	1,6	117,1
Ca (g kg ⁻¹)	8,8	11,9
Fe (g kg ⁻¹)	11,9	0,2
Cd (g kg ⁻¹)	0,001	n.a
Mn (g kg ⁻¹)	0,4406	n.a
Zn (g kg ⁻¹)	0,0811	n.a
Cu (g kg ⁻¹)	0,0273	n.a
Pb (g kg ⁻¹)	0,0041	n.a
Cr (g kg ⁻¹)	0,0191	n.a

n.a: Não avaliado

Fonte: Chacón *et al.* (2011); Lima *et al.* (2009).

Segundo Bernardino *et al.* (2016) a torta de filtro é aplicada como adubo orgânico de forma contínua em volumes de 80 a 100 toneladas por hectare de área. A aplicação deste resíduo diretamente no solo e em quantidades maiores do que o solo ou a cultura necessitam podem causar problemas ambientais como a perda de nitrogênio e metais pesados, a acidificação ou a salinização e, até a imobilização do nitrogênio (BERNARDINO *et al.*, 2016).

3.2.2 Bagaço de cana-de-açúcar

Resultante do processo de moagem da cana-de-açúcar para extração do caldo, o bagaço é o resíduo agroindustrial obtido em maior quantidade no Brasil (SILVA *et al.*, 2002). No processo de extração do caldo, a sua geração é variável. Cortez *et al.* (1992) afirmam que há uma geração de 250 kg de bagaço úmido para cada tonelada de cana moída e Canilha *et al.* (2007) afirmam que são gerados 144 kg por tonelada de cana moída.

Cerca de 60 a 90% deste resíduo é aproveitado para geração de energia e calor em indústrias sucroenergéticas (FAPESP, 1998): a fibra é separada nas moendas e é conduzida úmida às caldeiras, resultando nas cinzas que representam 5% do total alimentado (NUNES, 2009).

O aproveitamento energético ocorre na própria usina ou em outras usinas. Mas seu uso não se restringe apenas a isso: também é possível utilizar o bagaço na ração animal, na indústria química, na fabricação de papel, papelão e outros, como material alternativo para a construção civil e pode ser utilizado na produção de biomassa microbiana (SILVA *et al.*, 2002) e sua fonte de matéria orgânica é uma forma de fortalecimento para o solo em sistemas produtivos da cana (GOMES *et al.*, 2018).

A composição química do bagaço da cana-de-açúcar é apresentada na Tabela 2, segundo Silva *et al.* (2002).

Tabela 2 - Composição química do bagaço da cana-de-açúcar (continua).

Composição	Silva <i>et al.</i> (2002)
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	36,510
C (g kg ⁻¹)	542,500
N (g kg ⁻¹)	3,000
S (g kg ⁻¹)	-
P (g kg ⁻¹)	0,300
Mg (g kg ⁻¹)	-
K (g kg ⁻¹)	0,210
Ca (g kg ⁻¹)	-

Tabela 2 - Composição química do bagaço da cana-de-açúcar (conclusão).

Composição	Silva <i>et al.</i> (2002)
Fe (g kg ⁻¹)	2291,300
Cd (g kg ⁻¹)	Nd
Mn (g kg ⁻¹)	-
Zn (g kg ⁻¹)	0,215
Cu (g kg ⁻¹)	0,006
Pb (g kg ⁻¹)	Nd
Cr (g kg ⁻¹)	-

Nd: Não detectado

Fonte: Silva *et al.* (2002).

3.2.3 Cinza de bagaço da cana-de-açúcar

A cinza é resultado da queima do bagaço da cana-de-açúcar e possui umidade de aproximadamente 50,2% (MOURA *et al.*, 2021). Depois da queima, sua composição de minerais é de aproximadamente 47,1%, o que indica a presença de minerais e subprodutos utilizados durante a produção. O teor de carbono presente na cinza é de 5,48% e o de nitrogênio é 0,09% (MOURA *et al.*, 2021).

Na Tabela 3 é possível observar a composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar segundo alguns autores e a sua variação.

Tabela 3 - Composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar reportadas na literatura (resultados em % mássica e base seca) (continua).

Composição	Werther <i>et al.</i> (2000)	ECN (2018)	Jacome (2018)
SiO ₂	46,8	46,6	35,1
Al ₂ O ₃	14,6	17,7	14,0
Fe ₂ O ₃	11,1	14,1	14,2
CaO	4,9	4,5	7,1
MgO	4,6	3,3	5,3
Na ₂ O	1,6	0,8	0,5

Tabela 3 - Composição química da cinza de bagaço de cana-de-açúcar reportadas na literatura (resultados em % mássica e base seca) (conclusão).

Composição	Werther <i>et al.</i> (2000)	ECN (2018)	Jacome (2018)
SO ₃	3,6	2,1	3,2
K ₂ O	7,0	4,2	12
P ₂ O ₅	3,9	2,7	4,7
MnO	-	-	-
TiO ₂	2	2,6	2
Cl	-	-	-

Fonte: Werther *et al.* (2000); ECN (2018); Jacome (2018).

3.2.4. Vinhaça

A vinhaça, ou vinhoto, produzido a partir do processo da produção de etanol é um resíduo com alto potencial poluidor para o solo e os lençóis freáticos (FERRAZ *et al.*, 2000; MICHELLON *et al.*, 2008).

Conhecida por seu forte odor, a vinhaça é um líquido de coloração marrom-escuro, baixo pH, alto teor de potássio e com alta demanda química de oxigênio (DQO) (SILVA; BONO; PEREIRA, 2013).

Na Tabela 4 apresenta-se a composição química da vinhaça segundo alguns autores.

Tabela 4 - Composição química da vinhaça em kg m³.

Elemento Químico	Silva <i>et al.</i> (2013)	Paulino <i>et al.</i> (2002)
N	0,33	0,28
P ₂ O ₅	0,11	0,12
K ₂ O	1,7	2,4
CaO	0,57	1,1
MgO	0,33	0,24
SO ₄	1,5	5,48
Matéria Orgânica	19,1	-

Fonte: Silva *et al.* (2013); Paulino *et al.* (2002).

Apesar de sua composição ser conhecida como poluidora do meio ambiente, foi constatado por Barros *et al.* (2010), em estudo de 10 anos de duração, que a utilização de vinhaça na lavoura aumenta a disponibilidade de macronutrientes e diminui a de micronutrientes. Para Neves *et al.* (1983), a aplicação de vinhaça pode melhorar as características físicas do solo e aumentar a mobilidade de nutrientes em razão da maior solubilidade do efluente, desde que exista manejo adequado.

3.3 COMPOSTAGEM

Os resíduos da produção de álcool anteriormente apresentados, desde que passem por um processo de decomposição aeróbia da matéria orgânica por meio de microrganismos presentes nos próprios resíduos, como a compostagem, podem ser utilizados como fertilizante na agricultura ou na recuperação de áreas degradadas. Para a produção em grande escala, é necessário que o produto atenda às exigências mínimas de qualidade previstas na Resolução CONAMA nº 420/2009 (CONAMA, 2009), e a Resolução CONAMA nº481/2017 (CONAMA, 2017), que estabelece parâmetros dentro do processo de compostagem para garantir o controle e a qualidade ambiental.

Deste modo, a compostagem surge como uma alternativa de tratamento biológico destes resíduos provenientes do setor agroindustrial, e pode ser utilizada para resoluções de problemas ambientais e de economia no que diz respeito à compra de fertilizantes orgânicos (LEAL, 2006).

A compostagem é um processo biológico, aeróbico e controlado para visa promover a humificação dos resíduos orgânicos, convertendo-os a “composto orgânico” (PEREIRA NETO, 2007; INÁCIO; MILER, 2009). Este processo ocorre em duas etapas: na primeira ocorre a degradação ativa do material e, na segunda, a maturação, ou seja, a humificação do material orgânico, etapa final do processo que resultará no “composto orgânico” (MATOS *et al.*, 1998).

Para este processo é necessário que os resíduos utilizados sejam divididos em duas classes: resíduos com maior concentração de carbono e resíduos com maior concentração de nitrogênio. Como resíduos com maior concentração de carbono, pode-se considerar materiais lenhosos como cascas de árvores, aparas de madeira, podas de

jardins, folhas e galhos de árvores, palhas e fenos, e papel. Já entre os materiais com maior concentração de nitrogênio, pode-se englobar folhas verdes, estrumes de animais, urinas, solo, restos de vegetais hortícolas, etc (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

Para a preparação do composto orgânico são necessários materiais que se decompõem mais rapidamente e materiais que se decompõem mais lentamente (MAGALHÃES *et al.*, 2006). O composto final gerado depois da compostagem dos resíduos tem potencial para aplicação no solo e pode proporcionar consideráveis melhoras em suas propriedades físicas, aumentando a capacidade de retenção de água e a macroporosidade. No que diz respeito às propriedades químicas, pode-se aumentar a disponibilidade de macro e micronutrientes, a capacidade de troca catiônica e, quanto às propriedades biológicas, pode ocorrer o estímulo ao surgimento de microrganismos que agem no controle de fitopatógenos (MATOS *et al.*, 1998; FEBRER, 2002).

Bernardino (2016) estudou a compostagem de resíduos da indústria sucroenergética, com ênfase na torta de filtro, e constatou que o bioproduto gerado possui maior potencial de aplicação, pois suas características apresentam maior qualidade para ser utilizado como adubo orgânico. Oliveira (2008) explicou que isso se deve a uma quantidade de nutrientes que será retornada para o solo de forma mineral e orgânica, com melhorias químicas, físicas e biológicas para o meio.

3.3.1 Fatores que influenciam a compostagem

3.3.1.1 Temperatura

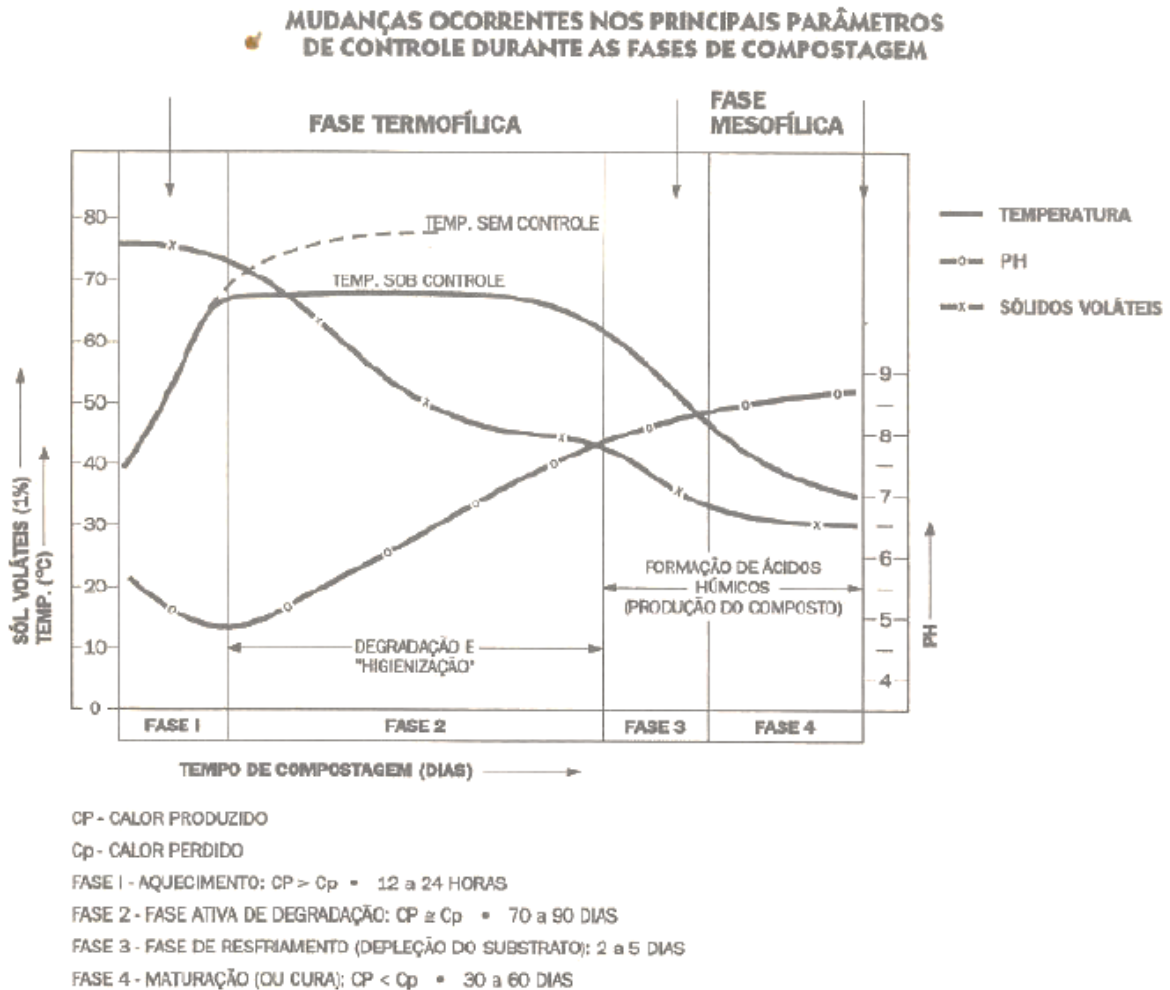
Segundo Pereira Neto (1988) e Tiquia, Tam e Hodgkiss (1997), a temperatura é um indicador de eficiência do processo, pois está relacionada à atividade metabólica e pode indicar a taxa de decomposição e a maturação do composto. O controle da temperatura deve ser feito pois, temperaturas acima de 70°C, por períodos longos, podem prejudicar os microrganismos, paralisar o processo ou até mesmo causar a combustão espontânea do composto (KIEHL, 2002). Além disso, para garantir a

higienização do composto, a Resolução CONAMA nº 481/2017 (CONAMA, 2017) estabelece temperaturas mínimas e tempos mínimos de sua duração.

O monitoramento dos dados de temperatura geralmente é feito por meio de termômetros digitais ou de mercúrio (LIMA JUNIOR *et al.*, 2017; PEDROSA *et al.*, 2013), o que pode dificultar a frequência de coleta e a confiabilidade das informações. Uma solução para otimizar a coleta de dados é a automatização desta atividade, assim a coleta tem maior frequência e menor intervalo de tempo, conseqüentemente maior representatividade, fornecendo mais dados para a tomada de decisão quanto ao manejo da compostagem (MICHELS *et al.*, 2017).

Para uma compostagem eficiente é necessário que os parâmetros citados anteriormente estejam relacionados (VALENTE *et al.*, 2009), uma vez que a atividade microbiana libera energia, aumentando a temperatura do processo (BIDONE e POVINELLI, 1999). Dessa forma, no processo de compostagem há quatro fases de temperatura bem definidas (BERNAL *et al.*, 1998a; TRAUTMANN E OLYNCIW, 2005): Fase mesofílica, fase termofílica, fase de resfriamento e fase de maturação que podem ser visualizadas na Figura 1.

Figura 1 - Fases da compostagem



Fonte: Kiehl (2012).

Na Figura 1 observa-se que ao longo do processo tem-se a alteração do comportamento da temperatura do material. Antecedendo a fase Termofílica, nos primeiros dias de compostagem, tem-se um período de aquecimento e a temperatura fica entre 20°C e 44°C, caracterizado como fase Mesofílica. Esta situação é importante para fornecer condições adequadas para o processo iniciar, mesmo durando poucos dias (MASSUKADO, 2008). Caso a temperatura não atinja os 44°C no terceiro dia, alguns parâmetros podem estar fora do controle, resultando, assim, na limitação da atividade microbiana (FERNANDES E SILVA, 1999). Em seguida, pode ser observado a fase Termofílica.

A fase Termofílica consiste no período da compostagem que pode ser identificado devido ao aumento da temperatura para 44°C a 60°C (MASSUKADO, 2008). Geralmente, as temperaturas ficam próximas de 55°C (TRAUTMANN; OLYNCIW, 2005). Devido à atividade microbiológica de organismos termofílicos, os polissacarídeos como amido, celulose e proteínas (polímeros complexos) são alterados em subprodutos, facilitando a degradação para outros organismos (PEREIRA NETO, 2007).

A fase de resfriamento pode ser identificada devido à temperatura do composto praticamente se igualar à temperatura ambiente e a quantidade de oxigênio requerida ser menor, o que torna o processo biológico mais lento (BARREIRA, 2005; SCHALCH; MASSUKADO, 2015).

A fase de maturação é caracterizada pelo processo de humificação (PEREIRA NETO, 1987; MATOS *et al.*, 1998). Os processos de estabilização da matéria orgânica levam à mineralização de parte do material lábil e à humificação de outra parcela, logo, existe uma diminuição no teor de matéria orgânica após os processos de estabilização, uma vez que parte do carbono contido no material inicial evolui para a atmosfera na forma de CO₂, devido à respiração dos organismos que transformam o material.

De acordo com Garg, Gupta e Satya (2006), a humificação pode ser considerada como o inverso da mineralização. Enquanto o processo de mineralização resulta na transformação do resíduo inicial em CO₂, H₂O e sais inorgânicos, a humificação se caracteriza pela conversão da matéria orgânica recente em composto rico em materiais orgânicos de alto peso molecular, como ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina, consideradas as frações da matéria orgânica com alto grau de estabilização.

Para Barreira (2005) a duração de todas as fases do processo pode variar de acordo com os resíduos escolhidos para a compostagem, dimensão das leiras, teor de umidade, granulometria, temperatura ambiente, entre outros parâmetros.

3.3.1.2 Relação C/N

Para Kiehl (2002) o carbono e o nitrogênio inicial no processo de compostagem deve ser numa proporção que proporcione melhores condições de compostagem, como 25/1 até 35/1, ou seja, 25 até 35 partes de C para uma de N. O carbono presente

na mistura é liberado como CO₂ e é responsável pelo crescimento microbiano. Os microrganismos consomem o carbono cerca de 15 a 30 vezes mais que o nitrogênio, mais comumente 30 vezes, o que justifica a compostagem ser mais eficiente numa proporção de 30/1 (EPSTEIN, 2011).

Caso a relação C/N inicial esteja desbalanceada, ou seja, quando se utiliza uma quantidade de C muito maior que 30, pode ocorrer uma deficiência de nitrogênio e o tempo de degradação do composto é prolongado; se a relação tiver muito abaixo do indicado, o excesso de nitrogênio é volatilizado na forma de amônia e pode resultar em odores desagradáveis e redução do tempo de degradação (BARREIRA, 2005).

A proporção de C/N pode alterar durante o processo de compostagem pela oxidação da matéria orgânica (liberação de CO₂, diminuindo a concentração de carbono) (ZHANG e HE, 2006). Para verificar a fase em que o processo se encontra, pode-se acompanhar a relação C/N durante a compostagem: um composto bioestabilizado apresenta relação C/N em torno de 18/1 e um composto humificado, tal proporção fica em torno de 10/1 (KIEHL, 2002). A Resolução CONAMA nº 481/2017 determina que é necessário garantir uma relação C/N menor que 20:1 para o composto final (CONAMA, 2017).

Os resíduos de torta de filtro possuem uma relação C/N inicial de 20/1 (CHACÓN *et al.*, 2011) e são considerados resíduos úmidos com potencial de degradação rápida, ou seja, a proporção deve ser corrigida com resíduos menos úmidos e proporção mais alta para que se evite o mau cheiro. O bagaço, por sua vez, possui uma relação 180/1 (SILVA *et al.*, 2002). Misturar tipos de resíduos pode contribuir com o alcance da relação C/N inicial ideal e, ainda, segundo Valente *et al.* (2009), pode facilitar a homogeneização do composto, contribuindo para uma melhor porosidade.

3.3.1.3 pH

A decomposição da matéria orgânica submetida ao processo de compostagem é possível de ser avaliada pelo parâmetro pH (KIEHL, 1985) e a faixa entre 5,5 e 8,5 é considerada ótima para o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela compostagem, já que boa parte das enzimas se encontram ativas nesta faixa de pH

(RODRIGUES *et al.*, 2006). Mas, para Pereira Neto (2007) a faixa entre 4,5 e 9,5 é a ideal para a compostagem ser desenvolvida, pois valores muito altos ou muito baixos são regulados pelos microrganismos que produzem subprodutos ácidos ou básicos pelo processo de degradação dos compostos, conforme necessidade do ambiente.

Quando ultrapassado o valor de 9,5, o pH pode trazer prejuízos ao processo, como a transformação do íon amônio (NH_4^+) em amônia (NH_3) resulta na perda de nitrogênio pela volatilização (MASSUKADO, 2008). Mas, para valores de pH menores que 4,5, pode-se trazer consequências como a redução da atividade microbiana, podendo, o processo, não atingir a fase termofílica (ANDREOLI *et al.*, 2001).

A decomposição do composto resulta, no início, a formação de ácidos orgânicos e a incorporação de carbono orgânico ao protoplasma celular microbiano e torna o meio mais ácido do que a fase inicial (KIEHL, 1985; VALENTE *et al.*, 2009).

É esperado para o final da compostagem que os valores de pH sejam próximos de 8, como afirma Kiehl (2002), beneficiando o efeito tampão no solo com sua aplicação (RODRIGUES *et al.*, 2003).

3.3.1.4 Microrganismos

Segundo Pereira Neto (1996) os microrganismos necessitam de macro e micronutrientes para sobreviver e converter a matéria orgânica pelo processo de degradação de resíduos. O carbono e o nitrogênio estão entre os nutrientes mais importantes para a degradação dos resíduos, já que o nitrogênio é utilizado para a síntese de proteínas e o carbono é considerado fonte de energia para os microrganismos (BATISTA e BATISTA, 2007).

Bactérias, fungos e actinomicetos são os principais microrganismos presentes no processo de compostagem, porém há outros organismos como algas, protozoários, nematóides, vermes, insetos e larvas que também podem surgir, e que dependem das características do material em compostagem. Esses organismos, na maioria das vezes, já se encontram nos resíduos, usufruindo as condições de temperatura, nutrientes e

oxigênio favoráveis para que possam degradar e estabilizar a matéria orgânica (KIEHL, 2004).

No início da compostagem, os microrganismos atuantes são os que metabolizam o nitrogênio orgânico transformando-o em nitrogênio amoniacal e, com a decomposição, a amônia pode ser perdida por volatilização ou até mesmo convertida para a forma de nitratos, pela nitrificação, processo que contribui para que o composto seja mais ácido que o material original. Mas, caso haja condições de anaerobiose, o nitrato pode ser perdido por desnitrificação e causar um efeito alcalinizante (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

Na fase mesofílica, fase em que acontece o início da decomposição dos resíduos orgânicos, predominam as bactérias, responsáveis pela degradação inicial da matéria orgânica, promovendo a liberação de calor e o consequente aumento da temperatura do composto (CORRÊA *et al.*, 1982)

Quando os fungos e as bactérias digerem a matéria orgânica, liberam-se ácidos no meio. Nesta fase, a redução do pH beneficia o crescimento de fungos e a decomposição da celulose e da lignina é favorecida (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

A energia produzida pelos microrganismos promove o aumento da temperatura, que, quando superiores a 44°C, favorecem a predominância dos microrganismos termofílicos (OLIVEIRA *et al.*, 2008). Estes são responsáveis pela decomposição acelerada da matéria orgânica. Na fase termofílica, as bactérias decompõem açúcares, amido, proteínas e outros compostos de decomposição facilitada, além de serem responsáveis pela disponibilização de nutrientes e fixação de nitrogênio (MASSUKADO, 2008). Sua rápida reprodução e sua vasta dieta recorrente da diversidade de enzimas que produzem, as tornam o grupo mais numeroso no composto (MASSUKADO, 2008).

Já os organismos como os fungos, são menos numerosos, porém superiores em biomassa. Eles facilitam a ação das bactérias destruindo a celulose. E quando o processo ocorre ou permanece em condições ácidas (pH<5), são os mais favorecidos. Estes fungos têm capacidade de modificar o exterior da pilha de compostagem e suas hifas têm capacidade de colonizar o seu interior dependendo de seu crescimento (FIALHO, 2007).

Porém, condições muito ácidas podem afetar organismos como actinomicetos, bactérias filamentosas semelhantes nos aspectos dos fungos. Os actinomicetos são importantes para a decomposição da celulose, hemicelulose, quitina e proteínas,

podendo atacar madeira, cascas e papel. Uma característica muito específica destes microrganismos é o odor de “terra fresca” que exalam quando próximo do final do processo (MASSUKADO, 2008).

Durante o processo de compostagem, há uma predominância de microrganismos em cada etapa, variando conforme as características do composto, como sua umidade, disponibilidade de oxigênio, temperatura (requisito que seleciona microrganismos meso e termofílicos), relação C/N e pH (KIEHL, 1985).

As bactérias e fungos mesófilos são predominantes na fase mesofílica de aquecimento e são produtores de ácidos. Bactérias, fungos e actinomicetos termofílicos são predominantes na fase termófila (KIEHL, 1985), onde é apresentado um pico de crescimento populacional de bactérias heterotróficas, devido à alta disponibilidade de compostos com presença de moléculas de fácil digestão, o que torna a atividade microbiológica ativa (DAL BOSCO *et al.*, 2017).

Os actinomicetos, apesar de serem microrganismos termofílicos, predominam na fase de maturação, junto aos fungos, decompondo a celulose e outros materiais mais resistentes (KIEHL, 1985).

Temperaturas acima de 55°C podem eliminar os microrganismos patogênicos. Já acima de 65°C, a grande maioria de microrganismos é eliminada, incluindo aqueles que são responsáveis pela decomposição. Neste caso é preciso controlar a temperatura umidificando e aerando o material (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

3.3.1.5 Aeração

Para realizar a decomposição do material é necessário a produção de energia por microrganismos. Estes necessitam de oxigênio para a oxidação biológica do carbono dos resíduos orgânicos. Parte desta energia produzida é utilizada no metabolismo dos microrganismos e a outra parte é liberada em forma de calor (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

A decomposição da matéria orgânica pode ocorrer por dois processos: aeróbio (na presença de oxigênio) e anaeróbio (na ausência de oxigênio). No processo aeróbio, os microrganismos aeróbios como fungos, bactérias e actinomicetos, predominam quando há disponibilidade de oxigênio livre (PEIXOTO, 1981). Já no processo anaeróbio, devido

ao nitrogênio não ter liberação completa e sendo convertido em aminas incompletas, há liberação de mau cheiro (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

Para que a atividade microbiana ocorra no processo de compostagem, é necessário que o ar seja introduzido pelo manuseio da leira, ou seja, o revolvimento, também chamado de aeração (FERNANDES e SILVA, 1999; BARREIRA, 2005). Trata-se da agitação e da mistura do material utilizando-se de ferramentas como pás e enxadas para a atividade.

Segundo Pereira Neto (1996) e Kiehl (2004), o processo de revolvimento é capaz de evitar altas temperaturas durante a compostagem, aumentar a velocidade de oxidação do material, diminuir a liberação de odores e reduzir o excesso de umidade do material que está sendo decomposto.

3.3.1.6 Umidade

Para a umidade, Kiehl (2002) afirma que deve estar em torno de 44% a 60%, pois caso esteja abaixo de 44%, a decomposição será lenta; e se estiver acima de 60%, a entrada de O₂ será reduzida devido à saturação por água e o sistema se tornará anaeróbio.

Para se controlar a umidade no processo de compostagem é possível realizar revolvimentos, ou seja, com a passagem do ar pela massa de resíduos, poderá ocorrer a evaporação da água e o material ficará mais seco. Para aumentar a umidade, pode-se irrigar a leira no momento do revolvimento (MASSUKADO, 2008).

No que se refere à compostagem dos resíduos da indústria sucroenergética, Manhães (1993) realizou a compostagem de bagaço de cana, torta de filtro, cama-de-curral e fosfato-de-araxá e obteve uma diminuição de 52% do volume de resíduos em relação à mistura inicial e um enriquecimento em relação a macro e micronutrientes, obtendo um produto final com condições adequadas à aplicação em solos e culturas.

Gomes *et al.* (2018) estudaram a compostagem de bagaço, torta de filtro e vinhaça e concluíram que, diante da disponibilidade dos resíduos agroindustriais, mostra-se eficiente a reciclagem da vinhaça com resíduos sólidos na mistura a ser compostada, uma vez que foi produzido um composto de alto valor agrônômico, livre do potencial

poluidor inicial e com maior estabilidade que a mistura que se utilizou água. Os autores utilizaram 5 L de vinhaça para cada quilograma de resíduos sólidos da mistura compostada, acrescidos na montagem e nos revolvimentos.

3.3.1.7 Granulometria

Outro fator importante é a granulometria dos materiais, visto que o tamanho das partículas dos resíduos tem influência direta na ação dos microrganismos. Ou seja, para uma maior atividade de degradação, a superfície de contato deve ser menor (BIDONE e POVINELLI, 1999).

Então, recomenda-se que os resíduos apresentem dimensões entre 1 e 5 cm, pois caso as partículas sejam muito finas é possível ocorrer compactação excessiva do material e dificultar a aeração (KIHTEL, 1985). Por outro lado, se as partículas forem muito grandes é preciso triturar o material antes de colocar os resíduos para compostar, resultando em uma maior superfície de contato para os microrganismos atuarem (KIEHL, 1985; FERNANDES e SILVA, 1999; VALENTE *et al.*, 2009).

3.4 Compostagem de resíduos da indústria sucroenergética

No experimento de Gomes (2011) utilizou-se resíduos de uma indústria sucroenergética e a temperatura atingiu sua fase termofílica dois dias depois da montagem de suas leiras, o que representa a intensa atividade microbiológica nesse período.

O pH das leiras fertirrigadas com vinhaça podem sofrer um pequeno aumento, devido à inserção de cátions presentes neste efluente e anaerobiose resultante do consumo de oxigênio na degradação da matéria orgânica da vinhaça, segundo explica Doelsch *et al.* (2009).

Nos experimentos de Gomes (2011) sua conclusão em relação aos efeitos proporcionados pela torta de filtro no composto enriquecido com sulfato de potássio são seus maiores teores de Ca, Mg, K, MO e P que estavam no composto com torta de filtro

e com isso os resultados para a elevação do pH na aplicação no solo foi melhor. A torta de filtro utilizada no tratamento também contribuiu para o aumento de teores de nitrato do solo em relação aos tratamentos com vinhaça, que contribuíram para a elevação dos teores de carbono solúvel em água no solo.

Segundo Gomes (2011) a inserção de vinhaça no composto orgânico fez com que houvesse maior formação de ácidos húmicos com maiores quantitativos de grupamentos fenolíticos, o que contribui para o aumento da CTC do solo.

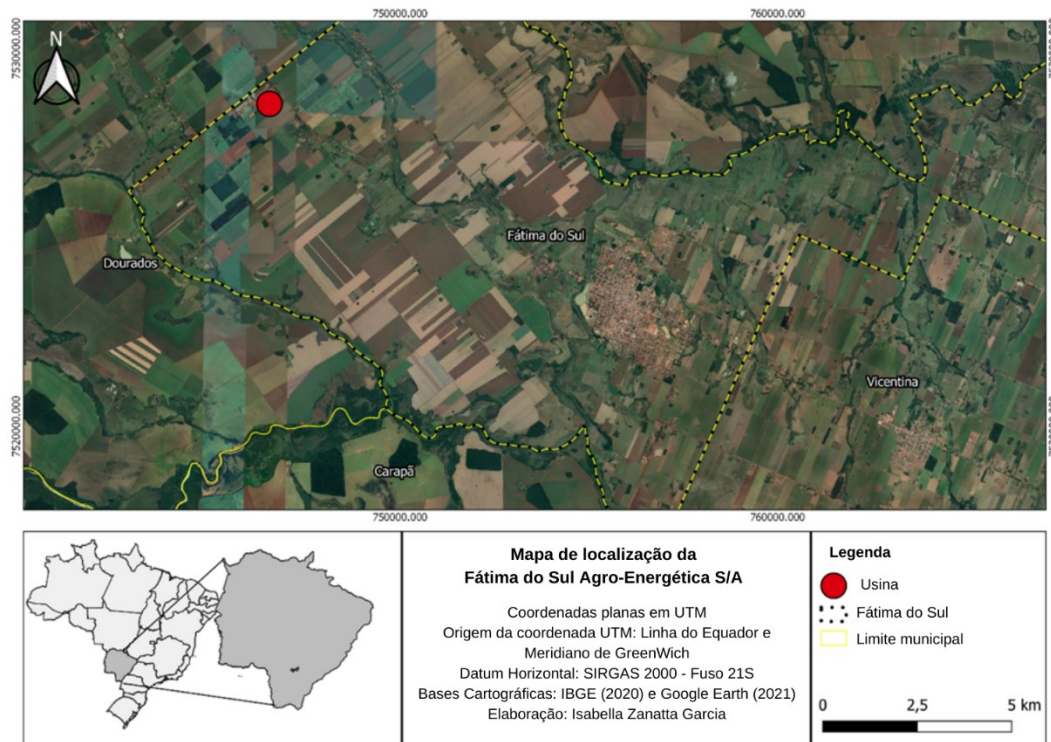
Neste sentido, Gomes *et al.* (2018) destaca que para que se ausente o potencial poluidor da vinhaça, produzir um insumo de alto valor agronômico, com maior estabilidade e reatividade, recomenda-se a compostagem com a reciclagem da vinhaça resultante da agroindustrial sucroenergética.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do local do estudo

Localizada entre as cidades de Fátima do Sul e Dourados, no Estado do Mato Grosso do Sul, está a Usina Fátima do Sul Agro-Energética S/A (Figura 2). Com aproximadamente 600 funcionários, a Usina é responsável pelo sustento de muitas famílias da região, e seus produtos são etanol hidratado e etanol anidro.

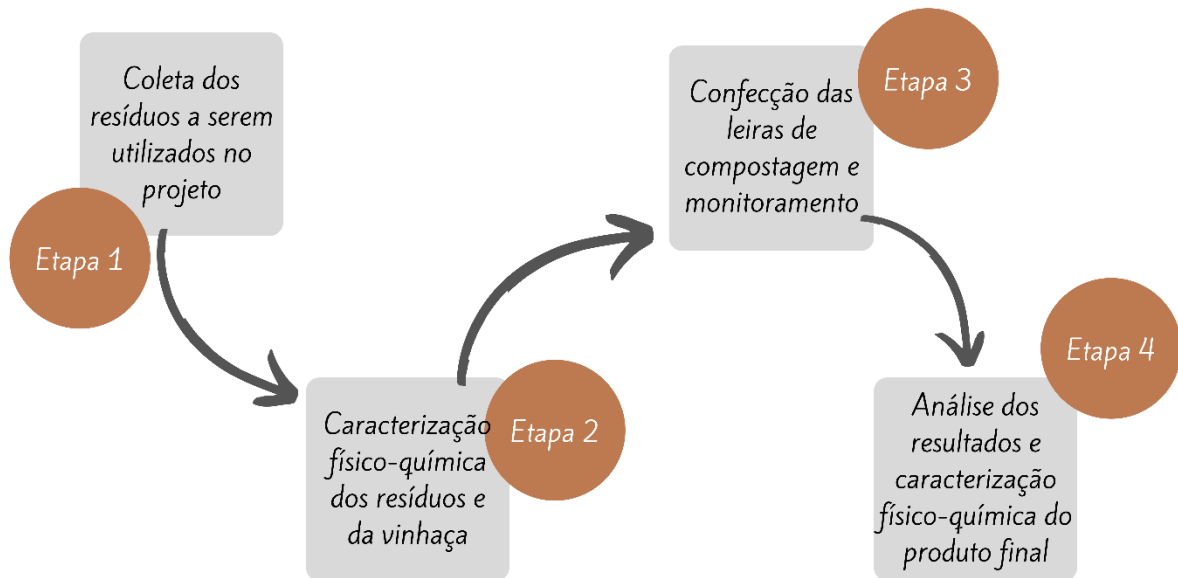
Figura 2 - Mapa de localização da Usina onde foi realizado o projeto.



Fonte: Autoria Própria (2021).

O presente projeto foi realizado nas imediações da Usina e o experimento foi dividido em quatro etapas, como está ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama das etapas do projeto

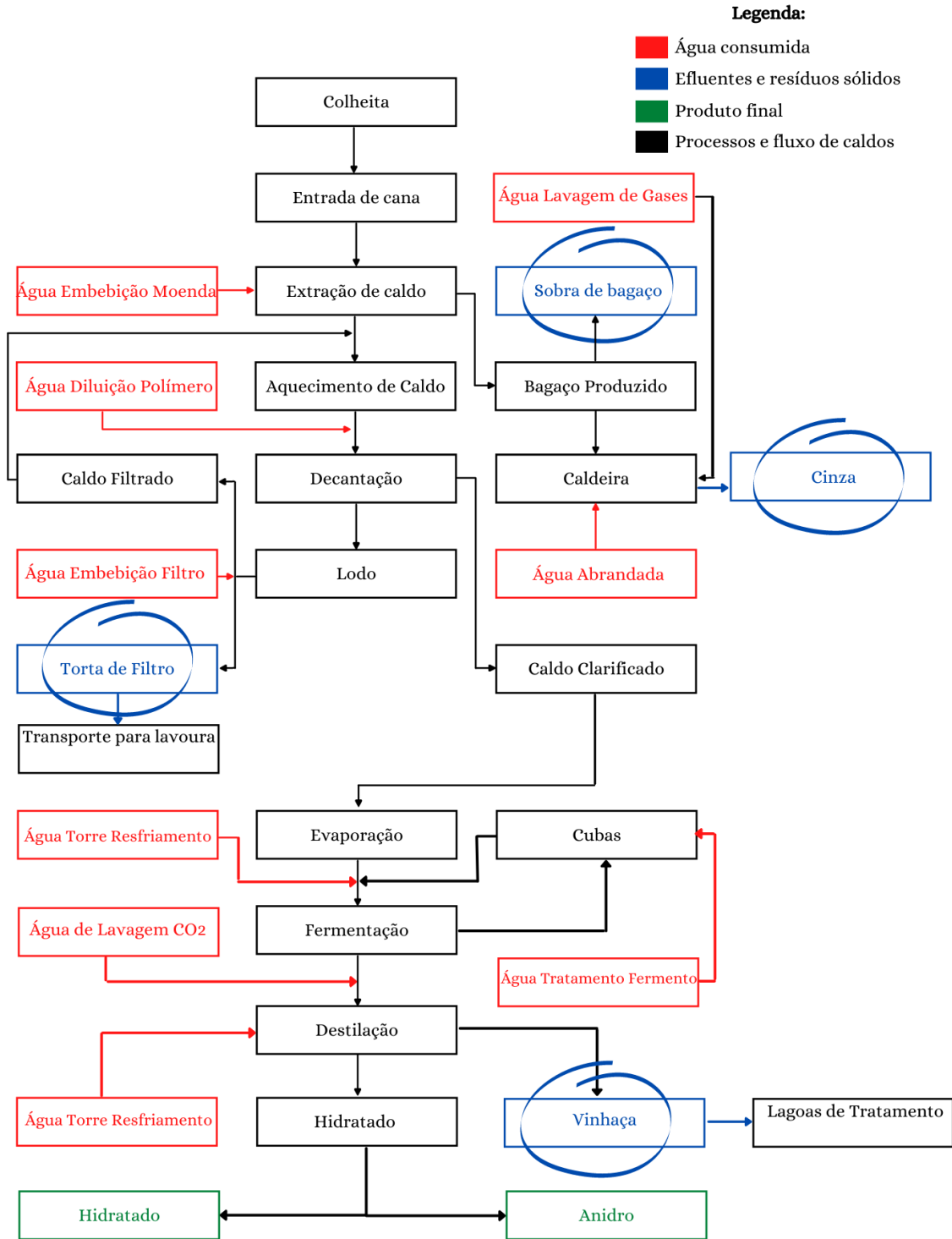


Fonte: Autoria Própria (2021).

4.2 Resíduos utilizados

Na Figura 4 apresenta-se o fluxograma do processo de produção de etanol na indústria em que este projeto foi desenvolvido e a respectiva geração de resíduos.

Figura 4 - Fluxograma do processo de produção de etanol e geração de resíduos



Fonte: Autoria Própria (2021).

Conforme apontado na Figura 4, a cana-de-açúcar chega até a Usina por meio de caminhões que são pesados em balança rodoviária para controle de cana-de-açúcar processada por período/safra e segue para o pátio industrial. Em seguida, a cana é descarregada na mesa alimentadora e, por meio de “grelhas” (limpeza a seco), ocorre a retirada de parte das impurezas da cana-de-açúcar. Na sequência, são utilizadas esteiras para conduzir a cana para o processamento.

Antes da extração do caldo, a cana-de-açúcar é picada e desfibrada para maximizar a extração do açúcar contido neste caldo. Na sequência, a cana-de-açúcar segue para o processo de moagem, no qual é realizada a extração do caldo pela moenda. A cana passa pelo primeiro “terno de moagem”, conjunto de quatro rolos (entrada, superior, pressão e saída). A cada terno que a cana passa, adiciona-se o caldo extraído do terno anterior. No último terno, adiciona-se água de embebição para umedecer e obter uma melhor extração do caldo (NOVA CANA, 2019).

Ao final do processo de moagem, obtém-se o caldo da cana, que é enviado para a sequência do processo e o primeiro resíduo, o bagaço da cana-de-açúcar, é parcialmente encaminhado para o processo de geração de vapor. O restante é enviado para a área de transbordo temporário para futura venda como subproduto. Da queima do bagaço tem-se a cinza de caldeira.

Em seguida, ocorre o processo de tratamento do caldo, que consiste na purificação e na concentração do caldo de cana, e visa melhorar as suas condições físico-químicas para aprimorar o etanol produzido.

Por meio de aquecedores que utilizam o vapor e trocas térmicas com outros fluidos do processo industrial, o caldo proveniente da moenda é aquecido, corrige-se o pH com cal e alimenta-se o decantador onde ocorre a clarificação por processos físicos e retira-se as impurezas do caldo, tornando-o clarificado.

O lodo retirado do decantador, que concentrou as impurezas do caldo, é encaminhado para um filtro rotativo de onde se extrai a torta de filtro, outro resíduo proveniente do processo industrial e que foi utilizado neste projeto. Depois da extração, este resíduo é, comumente, encaminhado diretamente para a lavoura, onde é incorporado de forma mecanizada ao solo antes do plantio da cana. Alves, Abdalla e Lima (2017) afirmam que a prática aumenta o teor de umidade no solo, que favorece o

crescimento de mudas em épocas de estiagem e resulta no aumento da fertilidade do solo (FRAVET *et al.*, 2010).

O caldo clarificado segue para o processo de concentração de açúcares e, pela evaporação de água, eleva-se o teor de açúcares. O caldo, então, concentrado, passa a chamar-se “xarope”, devido às suas características de viscosidade.

Neste processo há geração de efluente líquido constituído de águas residuárias de limpeza de pátio e precipitação. O caldo decantado segue para o pré-evaporador, resfriando-se a 30°C e torna-se o mosto, que é misturado com o creme de leveduras para a fermentação. Após as leveduras consumirem todo o açúcar, o líquido resultante é encaminhado para centrífugas onde a levedura é separada do mosto por diferença de densidades.

A extração do etanol do líquido ocorre em colunas de destilação, por diferenças de ponto de ebulição do etanol com os outros componentes. A essa destilação são obtidos dois fluidos: o etanol e a vinhaça

O efluente (vinhaça) é encaminhado para as duas lagoas de armazenamento e, em seguida, caminhões tanque fazem a sucção do líquido e o seu transporte até a lavoura.

Os resíduos compostados foram analisados em laboratório externo para determinação de suas características físico-químicas (Tabela 5).

Tabela 5 - Caracterização inicial dos resíduos.

Parâmetros	Métodos	Torta de Filtro	Bagaço de cana-de-açúcar	Cinza
Umidade (%)	65°C	69,83	36,47	79,84
Carbono Orgânico total (%)	Perda por ignição (ALCARDE, 2009)	28,14	48,92	18,90
Nitrogênio Total (%)	Digestão sulfúrica/Kjeldahl	1,09	0,50	0,44
Relação C/N	Cálculo (MAPA, 2017)	25,82	97,84	47,25
pH	CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹	5,60	5,70	8,00
Condutividade elétrica (mS cm ⁻¹)	Condutivímetro, extração em água destilada	0,95	1,43	0,65
Densidade (g cm ⁻³)	Relação Massa/Volume	0,92	0,16	1,00

Fonte: Departamento de Ciência do Solo – ESALQ/USP (2021).

Para a vinhaça foram analisados os parâmetros: pH, sólidos não filtráveis, dureza, condutividade elétrica, nitrogênio (N, NO₃, nitrogênio amoniacal total e nitrogênio Kjeldahl), sódio, cálcio, potássio, magnésio, fosfato total, DBO e DQO (Tabela 6).

Tabela 6 - Caracterização inicial da vinhaça.

Parâmetros	Métodos	Resultados
pH	-	4,47
Sólidos não filtráveis (mg L ⁻¹)	SM 22 ^a Ed. 2544 C e E	2.155,00
Dureza (mg L ⁻¹)	SM 23 ^a Ed. 2344 C	910,00
Condutividade Elétrica (µS cm ⁻¹)	SM 23 ^a Ed. 2510 B	2.536,00
N (mg L ⁻¹)	TC-PS-055	10,00
NO ₃ (mg L ⁻¹)	TC-PS-055	44,28
Nitrogênio Amoniacal Total (mg L ⁻¹)	TC-PS-027	10,00
Nitrogênio Kjeldahl (mg L ⁻¹)	SM 20 ^a Ed. 4500 Norg C	34,00
Sódio (mg L ⁻¹)	SM 23 ^a Ed. 3120 B / 3030 B/E	70,05
Cálcio (mg L ⁻¹)	SM 23 ^a Ed. 3120 B / 3030 B/E	76,95
Potássio (mg L ⁻¹)	SM 23 ^a Ed. 3120 B / 3030 B/E	347,80
Magnésio (mg L ⁻¹)	SM 23 ^a Ed. 3120 B / 3030 B/E	83,25
Fosfato Total (mg L ⁻¹)	SM 20 ^a Ed. 4500 P	79,50
DBO (5 dias) (mg L ⁻¹)	SM 23 ^a Ed. 5210 B	6.644,00
DQO (mg L ⁻¹)	TC-PS-010	13.587,00

Fonte: Laboratório BIOLAQUA Ambiental (2021).

A partir do resultado destas análises, fez-se o dimensionamento das leiras e os resíduos foram coletados no dia da montagem (seção 4.3).

4.3 Dimensionamento e montagem das leiras

Segundo Kiehl (2002) a relação C/N inicial ideal para a compostagem é de 30/1. No entanto, neste projeto, além de testar a relação de 30/1 (A), depois de feita a caracterização dos resíduos, ajustou-se a relação C/N inicial à realidade da planta industrial em questão, de modo que não fosse necessário importar resíduos para a condução da compostagem em larga escala. Por isso, testou-se também a relação C/N inicial (B) de 44:1. Esta relação (B) testada se deve à maior geração de bagaço de cana-de-açúcar produzida em relação aos demais resíduos.

Após os resultados das análises do teor de carbono e nitrogênio dos resíduos a serem tratados (Tabela 5), determinou-se o somatório da massa de C e N (em kg) de cada um dos resíduos estudados para a relação C/N inicial de 30:1 (Tabela 7). Para os cálculos iniciais, adotou-se as quantidades, em matéria seca, apresentadas na Tabela 7.

Em seguida, foi necessário a correção para massa úmida utilizando os valores de umidade dos resíduos (Tabela 7).

Para tanto, foi calculado os sólidos totais de cada amostra, como na equação (1):

$$ST = 100 - U \quad (1)$$

Onde:

ST: sólidos totais;

U: umidade total de cada resíduo em porcentagem.

Em seguida, calculou-se a massa úmida de cada resíduo pela equação (2) e os resultados foram apresentados na Tabela 7.

$$MU = \frac{MS}{ST} * 100 \quad (2)$$

Onde:

MU: massa úmida final;

MS: massa seca; e

ST: sólidos totais (equação 1).

Assim, foi determinado o volume total dos resíduos que compuseram as leiras utilizando a equação (3), que dividiu a massa úmida final pela densidade apresentada na Tabela 5 e o resultado foi obtido em litros.

$$Vi = \frac{MU}{\rho \left(\frac{g}{cm^3}\right)} \quad (3)$$

Onde:

Vi: volume de cada resíduo;

MU: massa úmida de cada resíduo, encontrada na equação (2); e

ρ : densidade de cada resíduo.

Somando-se os volumes de cada resíduo, obteve-se o V_f , e, em seguida, obteve-se a representação do volume de cada resíduo em porcentagem (equação 4):

$$\% = \frac{V_i * 100}{V_f} \quad (4)$$

Onde:

%: porcentagem de cada resíduo colocado na leira;

V_i : volume de cada resíduo; e

V_f : volume final de todos os resíduos.

Para cada leira definiu-se o volume de 300 L e realizando a relação deste volume com a porcentagem de volume de cada resíduo, foi possível obter o volume final de cada resíduo a ser colocado em cada leira (equação 5).

$$V_{fr} = \frac{V_i * 300}{100} \quad (5)$$

Onde:

V_{fr} : volume final de cada resíduo;

V_i : volume de cada resíduo.

A massa de cada resíduo, por sua vez, foi calculada pela equação (6), utilizando o respectivo volume e a densidade.

$$M = \rho * V_{fr} \quad (6)$$

Onde:

M : massa total de cada resíduo;

ρ : densidade de cada resíduo; e

V_{fr} : volume final de cada resíduo.

Na Tabela 7 apresenta-se a composição inicial das leiras 30:1 e na Tabela 8, as leiras 44:1.

Tabela 7 - Dimensionamento das leiras de relação C/N inicial 30:1.

Resíduo	C (%)	N (%)	C/N	Massa seca (kg)	Teor de água (%)	Massa úmida (kg)	% Relativa	C (kg)	N (kg)	C/N Inicial
Bagço	48,92	0,50	97,84400	0,34	44,55	11,88	10,52632	0,09784	0,00100	
Torta	28,14	1,09	25,81651	5,41	70,44	191,19	84,21053	0,45024	0,01744	30,09
Cinza	18,90	0,44	47,25000	0,51	80,29	17,92	5,26316	0,01890	0,00044	
Total						220,99	100,0000	0,56698	0,01884	

Fonte: Autoria própria (2021).

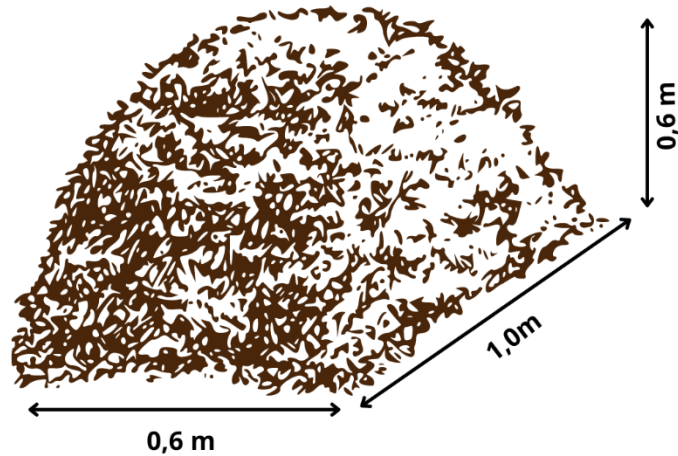
Tabela 8 - Dimensionamento das leiras de relação C/N inicial 44:1.

Resíduo	C (%)	N (%)	C/N	Massa seca (kg)	Teor de água (%)	Massa úmida (kg)	% Relativa	C (kg)	N (kg)	C/N Inicial
Bagço	48,92	0,50	97,84400	1,68	44,55	30,35	38,61004	0,48920	0,00500	
Torta	28,14	1,09	25,81651	4,74	70,44	85,46	54,05445	0,39396	0,01526	43,72
Cinza	18,90	0,44	47,25000	0,96	80,29	17,44	7,33591	0,03591	0,00076	
Total						133,25	100,00000	0,91907	0,02102	

Fonte: Autoria própria (2021).

As dimensões das leiras foram aproximadamente de 1m x 0,6m x 0,6m, como ilustrado na Figura 5.

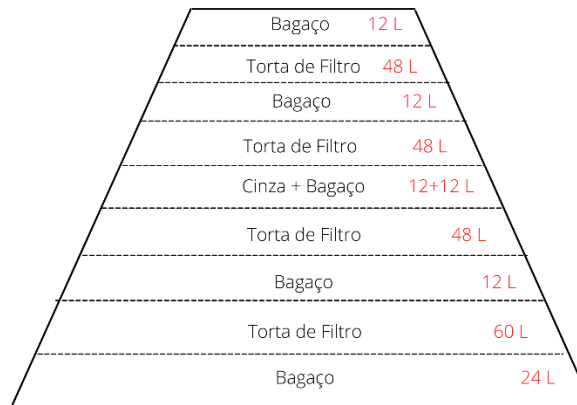
Figura 5 - Dimensionamento das leiras



Fonte: Autoria própria (2021).

Pereira Neto (1998) recomenda que a camada superior e a camada inferior sejam compostas pelo resíduo seco, ou seja, o resíduo que possui maior porcentagem de carbono em sua composição. Dessa forma, no momento da montagem das leiras os resíduos foram adicionados em camadas alternadas. Neste projeto, as leiras da relação C/N de 30:1 foram divididas em nove camadas como ilustrado na Figura 6.

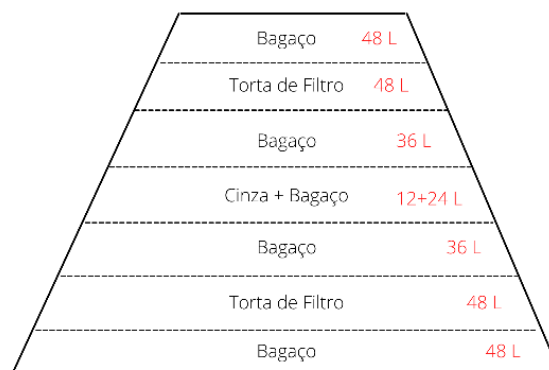
Figura 6 - Disposição das camadas e seus volumes de uma leira de compostagem da relação C/N inicial de 30:1



Fonte: Autoria própria (2021).

Já para as leiras da relação C/N de 44:1 foram divididas em sete camadas como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Disposição das camadas e seus volumes de uma leira de compostagem da relação C/N inicial de 44:1.



Fonte: Autoria própria (2021)

As leiras foram montadas no dia 27 de setembro de 2021, dentro de um barracão de madeira, nas imediações da Usina, com piso impermeável e cobertura para que o vento e a chuva não influenciassem no experimento da compostagem.

O experimento foi conduzido em duplicata e os tratamentos testados foram:

- 2 leiras com a relação C/N inicial 30:1 - umidificada com água;
- 2 leiras com a relação C/N inicial 30:1 - umidificada com vinhaça;
- 2 leiras com a relação C/N inicial 44:1 - umidificada com água;
- 2 leiras com a relação C/N inicial 44:1 - umidificada com vinhaça.

A vinhaça foi aplicada nas duas composições conforme apresentado no Quadro 2. Foram utilizados 44 litros de vinhaça ou água em cada leira de cada relação C/N. Para o monitoramento do teor de umidade da mistura foi utilizado teste da mão (NUNES, 2009).

Quadro 2 - Datas e quantidade de líquido inserido em cada revolvimento.

Data	Monitoramentos	Quantidade de líquido (água ou vinhaça)
27/09/2021	Montagem das leiras	-
15/10/2021	Revolvimento e umidificação das leias	44 L
25/10/2021	Revolvimento e umidificação das leias	44 L
29/10/2021	Revolvimento e umidificação das leias	44 L
05/11/2021	Revolvimento	-
12/11/2021	Revolvimento e umidificação das leias	44 L
17/11/2021	Revolvimento	-
23/11/2021	Revolvimento	-

Fonte: Autoria própria (2021)

4.4 Monitoramento das leiras e análise do composto

Durante 60 dias realizou-se o monitoramento da temperatura das leiras e da temperatura ambiente por meio de um sistema de coleta automatizada de dados, utilizando o sistema *Datalogger* na plataforma *Arduino*, com sensores *Ds18b20* encapsulados (Figura 8).

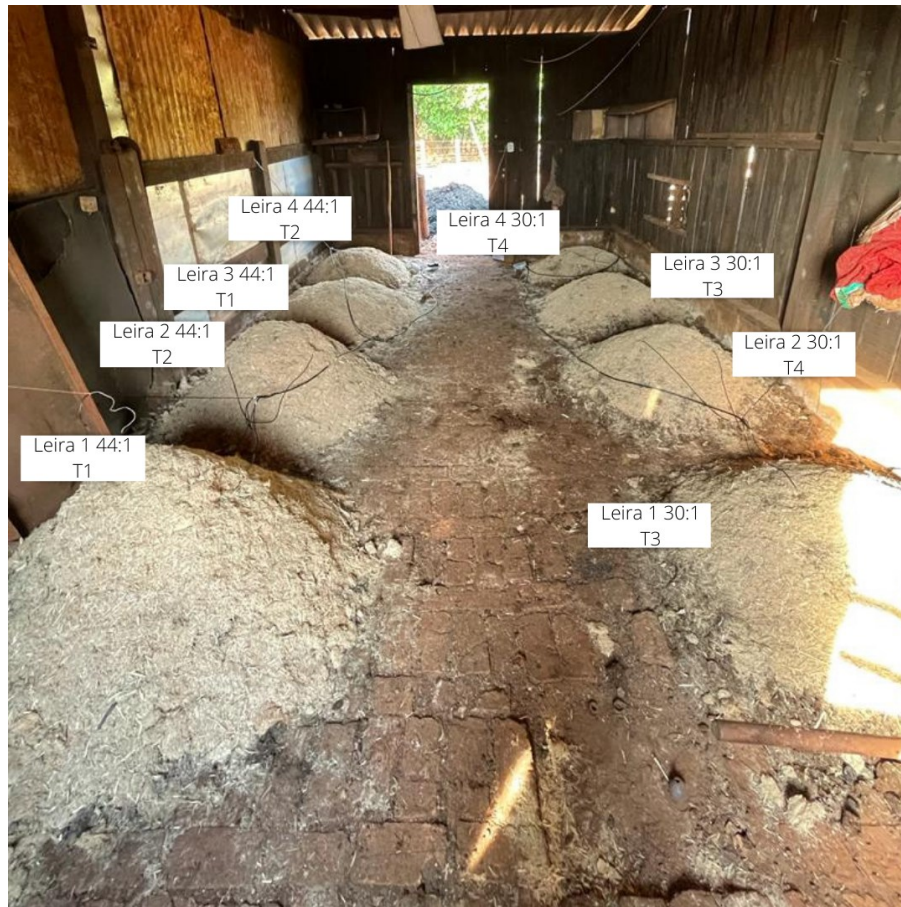
Figura 8 - Sensor utilizado para coleta de dados de temperatura



Fonte: Autoria própria (2021)

Os dados foram coletados a cada 10 minutos, seguindo a recomendação de (DAL BOSCO *et al.*, 2018) e foram armazenados em um cartão micro SD. Os dados foram recolhidos todos os dias (exceto aos finais de semana) para estudo das variações de temperatura e identificação das fases da compostagem. As leiras foram posicionadas de forma que suas duplicatas ficassem intercaladas. E os sensores foram posicionados em dois pontos estratégicos, a fim de coletar a temperatura de toda a leira a cada 10 minutos, como é possível visualizar na Figura 9.

Figura 9 - Sensores de monitoramento de temperatura em leiras de compostagem



Fonte: Autoria própria (2021).

Para fins de manutenção das condições ideais da compostagem, diariamente foi monitorada a umidade do material, pelo teste da mão (NUNES, 2009) e, quando necessário foi realizada a aeração manual, com auxílio de pás e enxadas. A adição de água ou vinhaça ocorreu durante os revolvimentos, que ocorreram com a frequência apresentada no Quadro 2.

Ao final do processo, aos 60 dias após o início da compostagem, determinou-se a perda de massa e volume por meio da pesagem do material em recipientes de volume conhecido.

A caracterização físico-química e agrônômica do composto obtido foi feita depois de 45 dias de processo, por laboratório externo (Departamento de Ciência do Solo – ESALQ/USP). Tal análise seguiu os parâmetros previstos na IN 61/2020, que “estabelece regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro,

embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura” (MAPA, 2020). Determinou-se: Umidade, Nitrogênio Total, Carbono Orgânico, pH, relação C/N, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio, Enxofre, Ferro, Manganês, Cobre, Zinco e Boro, seguindo as metodologias apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Metodologias utilizadas para as análises do composto final.

Parâmetros	Metodologias
Umidade	65°C
Nitrogênio Total	Digestão sulfúrica/Kjeldahl
Carbono Orgânico	Perda por ignição (ALCARDE, 2009)
pH	CaCl ₂ mol L ⁻¹
Relação C/N	Cálculo (MAPA, 2017)
Fósforo (P ₂ O ₅)	Extração ácida e determinação por colorimetria
Potássio (K ₂ O)	Extração ácida e determinação por fotometria de chama
Cálcio (Ca)	Extração ácida e determinação por absorção atômica
Magnésio (Mg)	Extração ácida e determinação por absorção atômica
Enxofre (S)	Extração ácida e determinação gravimétrica pelo método do sulfato de bário
Ferro (Fe)	Extração ácida e determinação por absorção atômica
Manganês (Mn)	Extração ácida e determinação por absorção atômica
Cobre (Cu)	Extração ácida e determinação por absorção atômica
Zinco (Zn)	Extração ácida e determinação por absorção atômica
Boro (B)	Extração ácida e determinação por colorimetria pelo método de Azometina-H
Condutividade Elétrica (mS cm ⁻¹)	Condutivímetro, extração em água destilada

Fonte: Departamento de Ciência do Solo – ESALQ/USP (2021).

A amostragem do composto de todas as leiras se deu pela técnica do quarteamento como sugere a norma brasileira NBR 10.007/2004 (ABNT, 2004b) que corresponde à homogeneização do resíduo sólido, divisão em quatro partes, sendo tomadas as partes opostas e repetindo o procedimento até que se obtenha a quantidade necessária como amostra.

Para a realização da análise qualitativa da descaracterização do material após a compostagem, foi realizado registro fotográfico de cada resíduo antes da montagem das leiras e do composto do final do processo, ou seja, depois de 60 dias de compostagem.

4.5 Análise dos resultados

Com os resultados de redução de massa (seca e úmida, volume e caracterização do composto final) calculou-se a média, por tratamento, e o desvio padrão dos dados.

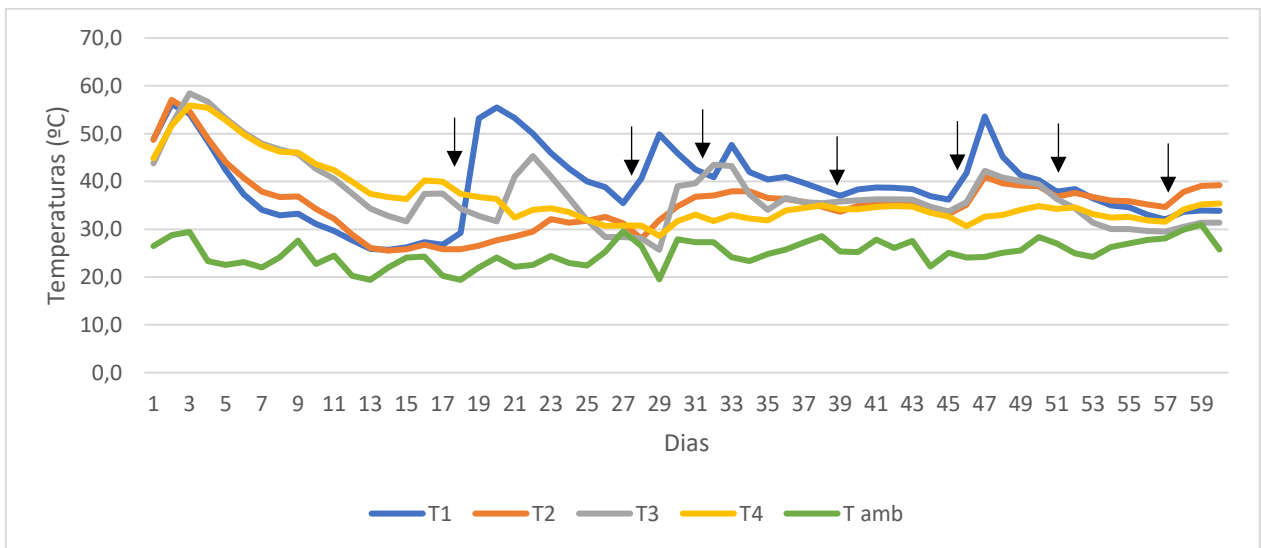
A comparação de médias dos dados de redução de massa e volume foi feita pelo Teste de Scott-Knott, por meio do *Software* Sisvar (FERREIRA, 2019). Os demais gráficos foram produzidos no *Software* Excel®.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Temperatura

No processo de compostagem, a temperatura é um indicador da degradação dos resíduos. Caracterizada por ser um processo exotérmico, Fialho (2007) explica que, quanto maior a temperatura, isso significa que mais acentuada é a atividade microbiana. O comportamento das temperaturas médias das leiras em 60 dias de processo de compostagem está apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Gráfico das temperaturas médias dos tratamentos



Nota 1: T1: C/N 44:1 com vinhaça; T2: C/N 44:1 com água; T3: C/N 30:1 com vinhaça; T4: C/N 30:1 com água.

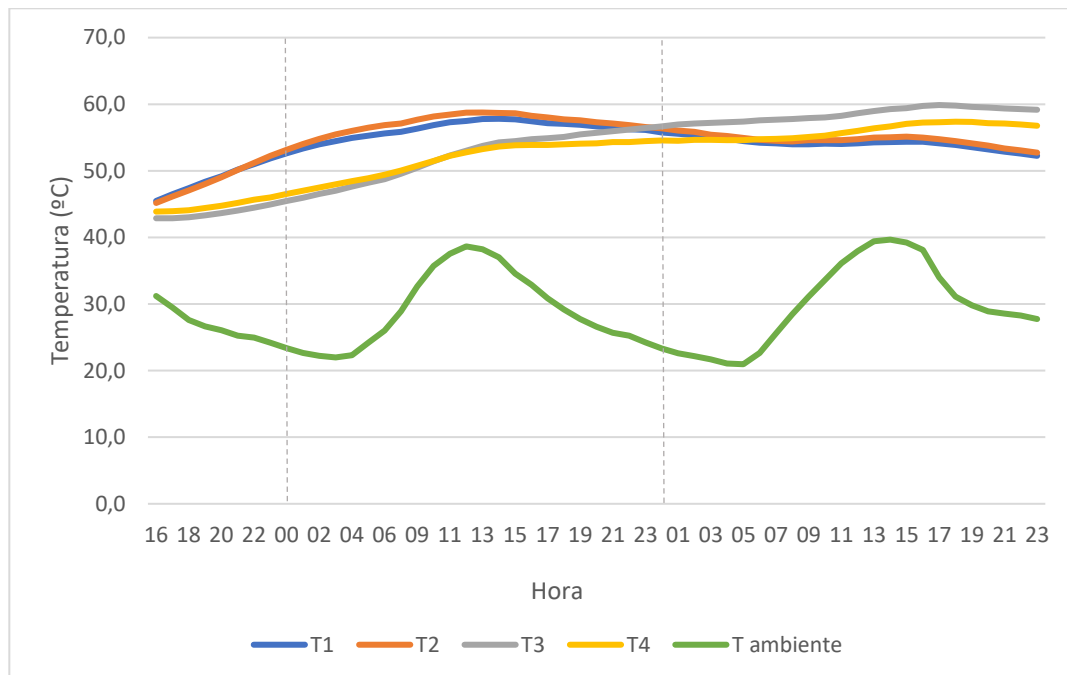
Nota 2: Setas: Revolvimentos e/ou umedecimento.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Conforme pode-se observar na Figura 10 não foi possível identificar as fases da compostagem tal qual descreveram Bernal *et al.* (1998), Trautmann e Olynciw (2005) e Kiehl (2012). Por outro lado, nota-se que as temperaturas médias permaneceram abaixo de 60 graus ao longo de todo o processo e sempre acima da temperatura ambiente, indicando a presença da atividade microbiana na degradação dos resíduos.

É possível observar, nitidamente, apenas a primeira fase, caracterizada pela rampa de aquecimento das leiras (Figura 11), que teve duração de dois dias para os tratamentos T1 e T2, atingindo respectivamente as temperaturas médias de 56,2 e 57,1°C. Já para os tratamentos T3 e T4, a rampa de aquecimento teve duração de três dias, até atingir o pico de temperatura de 58,4 e 55,9°C, respectivamente.

Figura 11 - Rampa de aquecimento dos tratamentos



Nota 1: T1: C/N 44:1 com vinhaça; T2: C/N 44:1 com água; T3: C/N 30:1 com vinhaça; T4: C/N 30:1 com água.

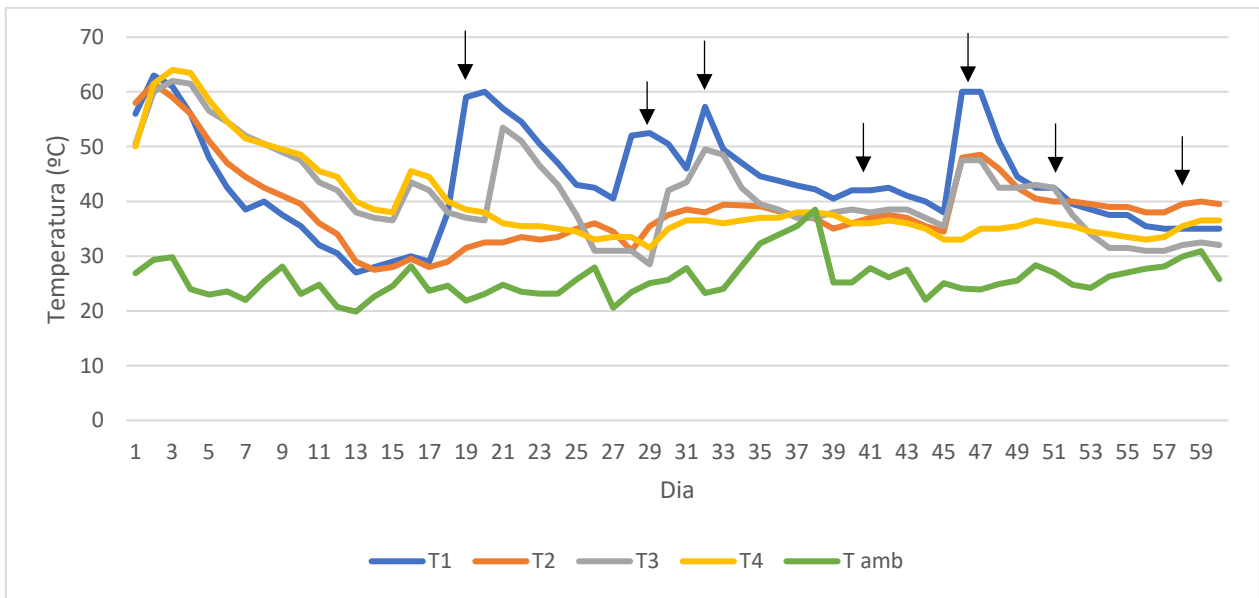
Fonte: Autoria Própria (2021).

Segundo Kiehl (1985) esta fase de aquecimento (Figura 11) pode ser alcançada entre dois e três dias e se as condições forem favoráveis pode-se alcançar temperaturas de 60°C a 70°C. Essa diferença de duração da fase de aquecimento pode estar relacionada à relação C/N inicial, visto que as leiras de relação C/N inicial 44:1 atingiram a máxima temperatura antes das leiras de 30:1. Gomes *et al.* (2018) explicam que a relação C/N entre 30:1 e 40:1 é ideal para a compostagem de resíduos, pois se for superior a 40:1 poderia resultar em retardo do processo, enquanto a relação menor que 30:1 pode causar perdas de nitrogênio para a atmosfera. Porém, neste experimento, não

foi observado retardo no início da degradação dos resíduos pelas leiras com relação C/N inicial de 44:1, que tiveram uma rampa de aquecimento mais rápida em relação às leiras com relação C/N inicial de 30:1.

Na Figura 12 estão apresentadas as variações de temperaturas máximas durante todo o processo de compostagem. Destaca-se que a maior temperatura máxima do processo foi observada no terceiro dia, no tratamento T4, registrando 64°C.

Figura 12 - Gráfico das temperaturas máximas dos tratamentos ao longo do processo de compostagem



Nota 1: T1: C/N 44:1 com vinhaça; T2: C/N 44:1 com água; T3: C/N 30:1 com vinhaça; T4: C/N 30:1 com água.

Nota 2: Setas: Revolvimentos e/ou umedecimento.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Os tratamentos T1 e T2 atingiram a máxima temperatura 21 e 18 horas após o início do processo, respectivamente, enquanto os tratamentos T3 e T4 atingiram as máximas temperaturas 24 e 23 horas após o início da compostagem, respectivamente. Porém, os tratamentos T3 e T4 permaneceram com temperaturas elevadas por mais tempo comparando-se com os tratamentos de relação C/N 44:1 (T1 e T2).

Conforme pode-se observar na Figura 12, no 18º dia foi realizado o primeiro revolvimento das leiras, seguindo a recomendação de Oliveira *et al.* (2008), que apontam

para o primeiro revolvimento sendo realizado duas a três semanas depois do início do processo. Nota-se que o revolvimento realizado no 18º dia resultou num pico de temperatura máxima para T1 e T3 aos 19º e 21º dia, respectivamente. Fernandes e Silva (1999) explicam que o aumento da temperatura durante a compostagem é consequência do metabolismo microbiano fazendo a decomposição. Vale destacar que ambos os tratamentos receberam vinhaça no revolvimento do 18º dia de compostagem. Considerando que a vinhaça é rica em matéria orgânica de fácil decomposição, tal comportamento pode ser explicado pelo aumento da atividade microbiana nestes tratamentos (GOMES *et al.*, 2018). Fernandes e Silva (1999) explicam também que a população de microrganismos termofílica é muito ativa, provocando intensa e rápida degradação da matéria orgânica, com consequente aumento da temperatura.

O efeito dos revolvimentos na temperatura dos tratamentos T1 e T3 foi representado por picos de máxima temperatura, nos primeiros 45 dias. Já quanto aos tratamentos T2 e T4, nota-se, na Figura 12, que os revolvimentos tiveram menor efeito nas temperaturas máximas. As temperaturas máximas atingidas nestes tratamentos foram de 61,5 e 64°C, respectivamente, nos dias 2 e 3 após o início do processo, ou seja, sem qualquer relação com os revolvimentos.

Hassen *et al.* (2001) afirmam que temperaturas elevadas são fundamentais devido à necessidade de eliminação de patógenos na compostagem, em especial quando se utilizam resíduos com potencial de contaminação. CONAMA (2017) apresenta as temperaturas necessárias para a sanitização do composto e sua duração no processo, conforme demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Tempo e temperaturas exigidas para possível sanitização do composto conforme a literatura.

	Tipo de organismo	Tempo mínimo de exposição (minutos)	Temperatura (°C)
Bactérias	<i>Salmonella</i>	20 - 30	55 – 60
	<i>E. coli</i>	15 - 20	60
Helmintos	<i>Teania saginata</i>	Alguns minutos	55
	<i>Ascaris lumbricoides</i>	50 - 60	> 50

Fonte: CONAMA (2017).

É possível identificar na Tabela 11 as temperaturas máximas atingidas para cada tratamento, quando estas ocorreram e sua duração.

Tabela 11 - Temperaturas máximas atingidas e seus respectivos dias para cada tratamento.

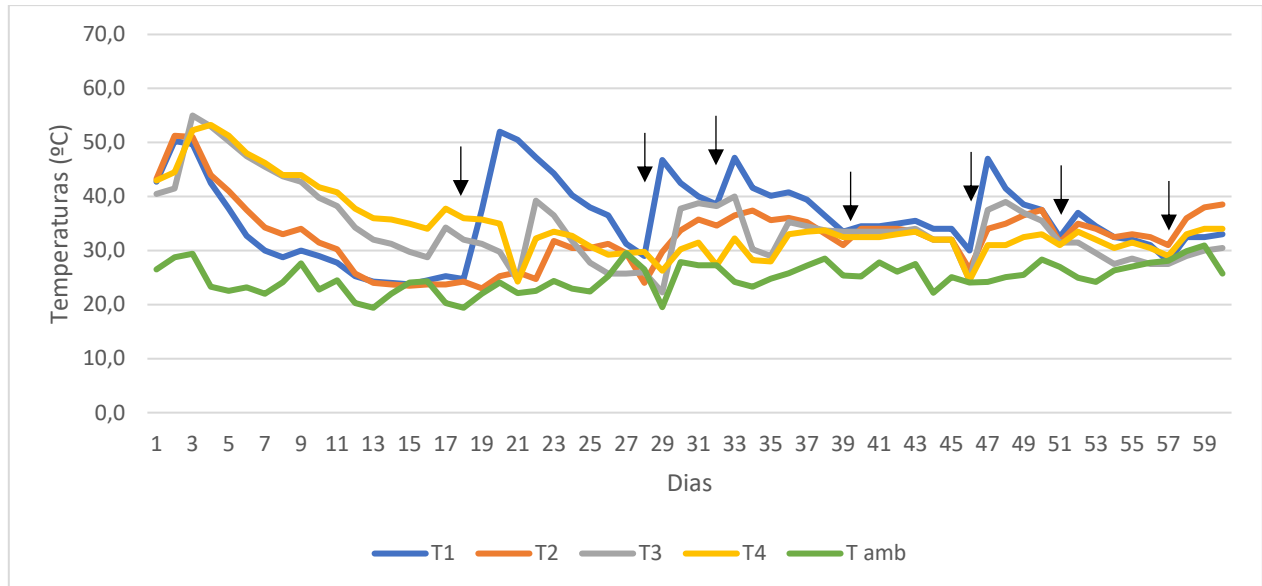
Tratamentos	Temperatura Máxima (°C)	Dia de máxima temperatura	Tempo de permanência na temperatura máxima (minutos)
T1	63,0	2º	120
T2	61,5	2º	280
T3	62,0	3º	371
T4	64,0	3º	481

Fonte: Autoria Própria (2021).

Os tratamentos que atingiram maiores temperaturas foram T1 e T4. No entanto, todos os tratamentos atingiram as temperaturas e seu respectivo tempo de duração para eliminação de *Salmonella*, *E. coli*, *Teania saginata* e *Ascaris lumbricoides* segundo a Resolução CONAMA nº481/2017 (CONAMA, 2017). Valores semelhantes também foram encontrados por Haroun *et al.* (2007), que compostaram lodo de esgoto com maravalha, esterco de galinha, melão e farelo de arroz e relataram 64°C de temperatura máxima.

Na Figura 13 é possível observar o perfil de temperatura mínima dos tratamentos em todo o processo.

Figura 13 - Gráfico das temperaturas mínimas de cada tratamento ao longo do processo



Nota 1: T1: C/N 44:1 com vinhaça; T2: C/N 44:1 com água; T3: C/N 30:1 com vinhaça; T4: C/N 30:1 com água.

Nota 2: Setas: Revolvimentos e/ou umedecimento.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Nota-se na Figura 13 que até o primeiro revolvimento ocorrer, as maiores temperaturas mínimas foram observadas para T3 e T4 e, quando houve o primeiro revolvimento, assim como para as temperaturas máximas (Figura 12), observou-se a maior temperatura mínima para T1, 46 horas após o revolvimento e, em 75 horas, observou-se a maior temperatura mínima para T3, mais uma vez indicando o efeito da vinhaça na atividade de degradação dos resíduos. Observa-se ainda que logo após os revolvimentos ocorre um decréscimo da temperatura mínima das leiras (pico invertido) em T3 e T4, por exemplo, aos 18 dias, 28 dias, 32 dias, 39 dias, 46 dias, 51 dias e 57 dias. Isso se dá em virtude do desprendimento de calor aprisionado no interior das leiras no processo de revolvimento.

A partir do 53º dia de processo de compostagem as temperaturas mínimas dos tratamentos se aproximaram da temperatura ambiente, no entanto, ainda estavam superiores a ela. Trautmann *et al.* (2005) explicam que à medida em que o processo de compostagem ocorre, a taxa de degradação se torna mais baixa devido à redução da disponibilidade de nutrientes e da atividade microbiana.

Quando a temperatura do composto se aproxima da temperatura ambiente por determinado período, sem mudança drástica de temperatura, acredita-se que o composto está curado. Entretanto, este parâmetro sozinho não deve ser utilizado para verificar a maturidade do composto (VALENTE *et al.*, 2009). Neste caso em específico, não se pode fazer tal afirmação, visto que as temperaturas máximas (Tabela 12) e mínimas (Tabela 13) ainda estavam acima da temperatura ambiente, mesmo no fim do período de monitoramento.

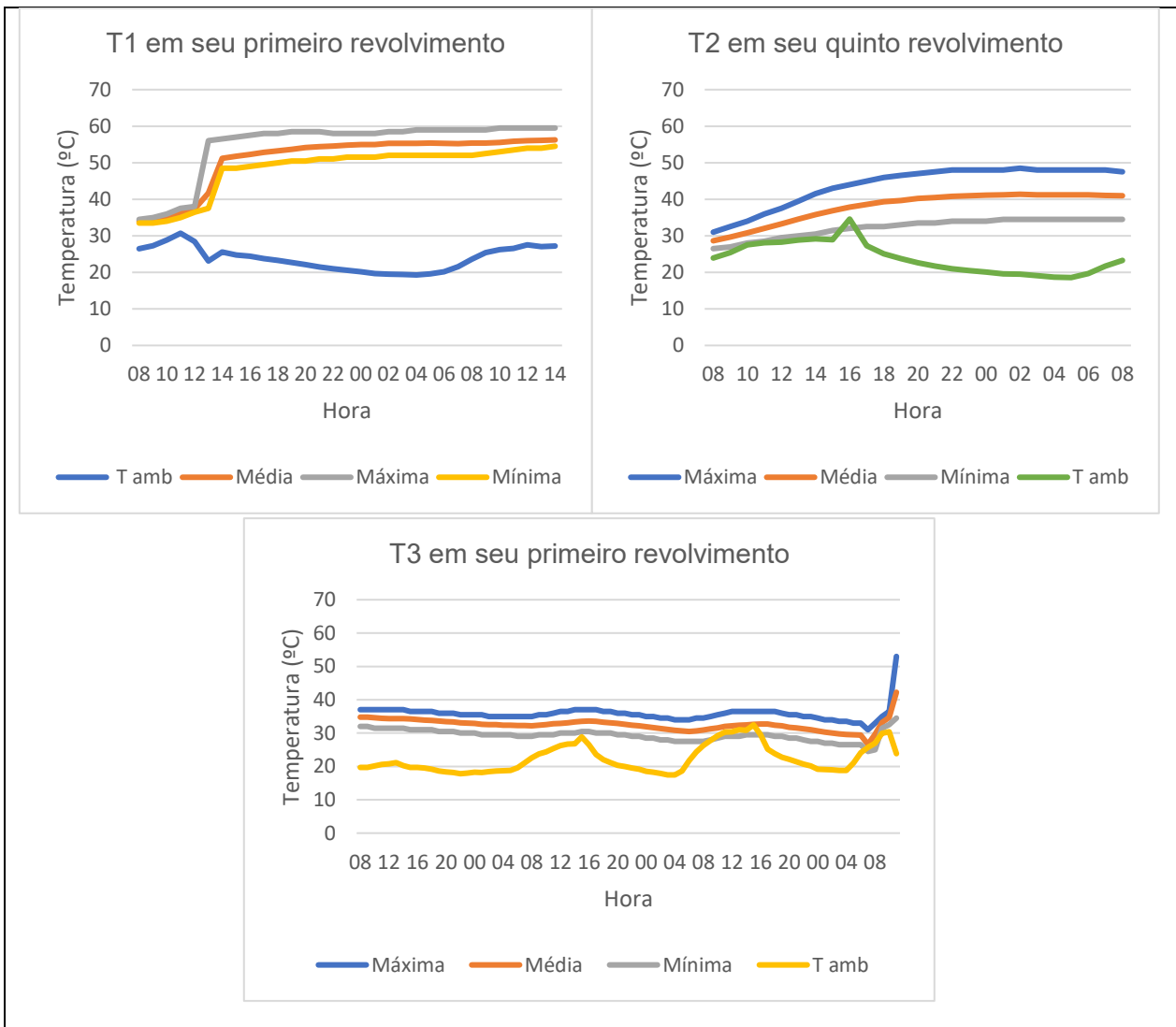
Ainda em relação aos efeitos dos revolvimentos, na Figura 14 é possível observar o comportamento da temperatura de T1 após esta intervenção no 18º dia.

Observa-se na Figura 14 que o revolvimento foi realizado às 08h. Cerca de 4 horas depois observou-se o aumento de 12 graus Celsius em relação à temperatura instantes após o revolvimento. Já em relação à temperatura ambiente, a máxima temperatura ambiente foi observada às 11 horas e, 2 horas depois, observou-se a máxima temperatura na leira. Isso demonstra a intensa atividade microbiana, estimulada pelo processo de aeração e umidificação do material com a vinhaça (GOMES *et al.*, 2018) e a importância de um monitoramento frequente do parâmetro temperatura, para compreender a dinâmica do processo de compostagem. Taiatele Jr (2014) em compostagem de resíduos domiciliares com a presença de biopolímeros, observou que este atraso entre a máxima temperatura do dia e a máxima temperatura da leira era de 3 horas, semelhante ao observado na presente pesquisa.

Para o T2, a maior diferença de temperatura depois do revolvimento foi no quinto revolvimento, com uma diferença de 17°C comparando a temperatura antes do revolvimento até o seu pico, que foi alcançado depois de 14 horas deste procedimento, como mostrado na Figura 14.

Para o tratamento T3, a máxima temperatura foi alcançada somente depois de 74 horas depois do primeiro revolvimento (Figura 14).

Figura 14 – Comportamento dos tratamentos após o revolvimento de maior pico de temperatura.



Nota 1: T1: C/N 44:1 com vinhaça; T2: C/N 44:1 com água; T3: C/N 30:1 com vinhaça; T4: C/N 30:1 com água.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Já para o tratamento T4 foi possível observar nas figuras de temperaturas médias (Figura 10), máximas (Figura 12) e mínimas (Figura 13), que depois de todos os revolvimentos o composto não reagiu a nenhum deles significativamente, não alterando ou tendo picos de temperatura que ilustrasse o efeito dos revolvimentos e umedecimentos. Gomes (2012) estudou a compostagem utilizando resíduos como bagaço de cana-de-açúcar, torta de filtro e esterco bovino regados com porcentagens

diferentes de vinhaça e constatou que apenas a leira com torta de filtro (sem mistura com outros resíduos) reagiu aos revolvimentos e à umidificação. As leiras com resíduos diferentes não alteraram significativamente sua temperatura com os revolvimentos, a exemplo do T4, neste trabalho.

O monitoramento diário das temperaturas das leiras é de grande importante para a tomada de decisões em relação à quando realizar os revolvimentos e umedecimentos. Normalmente, as pesquisas relacionadas ao monitoramento da compostagem de resíduos fazem monitoramentos diários, uma vez ao dia, por meio de coleta manual e com a utilização de termômetros digitais ou de mercúrio, o que dificulta o monitoramento, tornando-o lento e com pouca frequência (LIMA JUNIOR *et al.*, 2017; MICHELS *et al.*, 2017; PEDROSA *et al.*, 2013). Na Figura 15 é possível observar a variação de temperatura de cada tratamento ao longo do dia de maior temperatura. Escolheu-se, para tanto, o dia em que não houve influência da fase de aquecimento nos tratamentos.

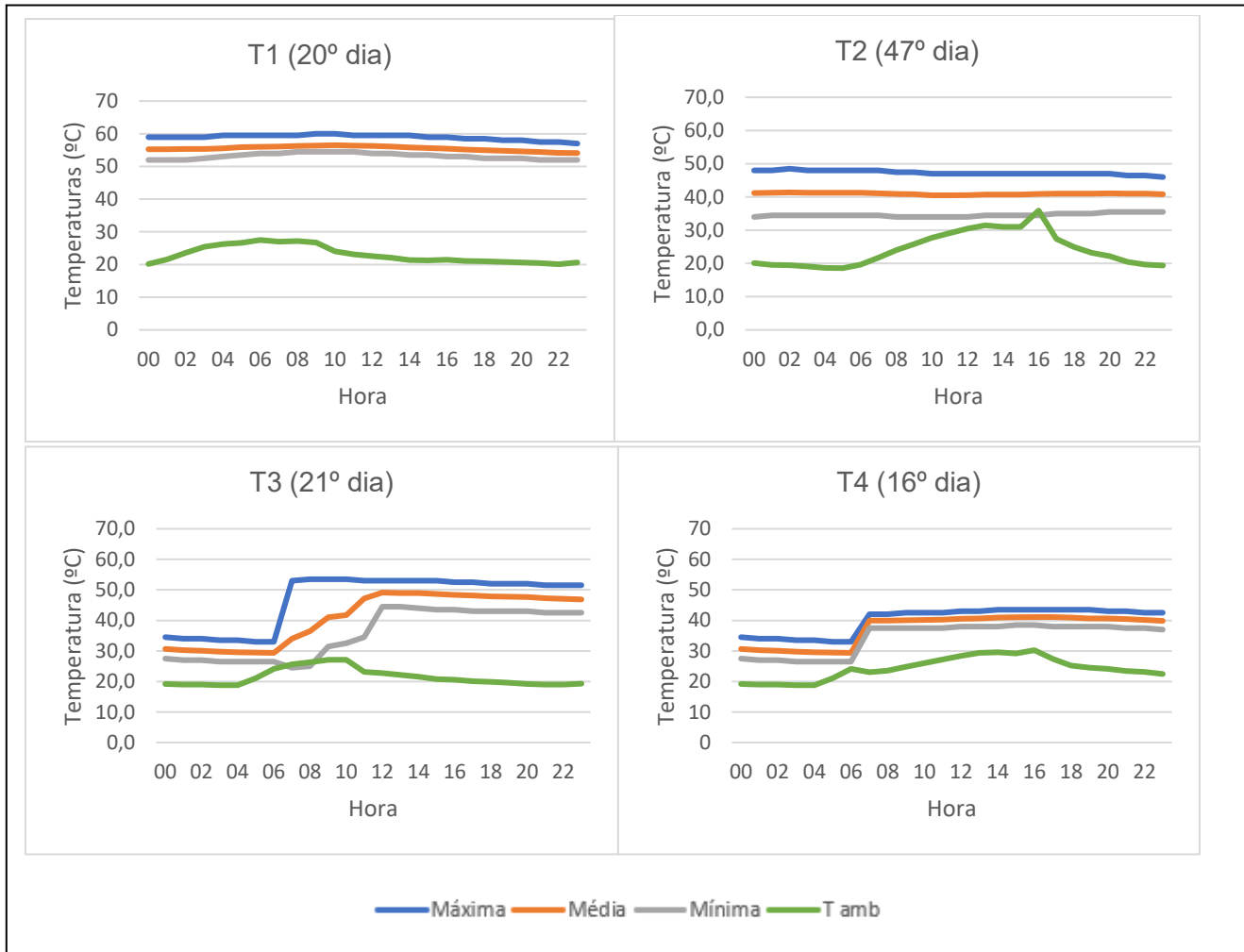
Quanto à variação da temperatura, o tratamento T1 (Figura 15) variou 7 °C, de 52°C para 59°C, em apenas uma hora de monitoramento no horário (entre 00h e 01h) enquanto ao final do dia, às 23h, variou de 54,1 a 57°C, ou seja, apresentou uma menor variação de temperatura (2,9°C) no final do dia.

Já para o tratamento T2 (Figura 15), às 00h do 47º dia, sua temperatura mínima foi de 34°C e a máxima de 48°C com variação de 14°C dentro de uma hora monitorada. Já às 23h, a variação foi de 10,5°C, saindo de 35,5 até 46°C em uma hora de monitoramento.

Para o tratamento T3 (Figura 15), no horário 00h do 21º dia, a temperatura mínima era de 27,5 °C e a máxima 30,6°C com uma variação de 3,1°C dentro de uma hora de monitoramento. Já no final do dia (às 23h), obteve-se a mínima de 42,5 e a máxima de 51,5°C, com uma variação de 9°C.

O tratamento T4 (Figura 15), apresentou uma variação de 27,5°C até 30,6°C, ou seja, 3,1°C das 00h até 1h e no final do dia, às 23h, obteve-se uma variação de 2,9°C, sendo a mínima de 37°C e a máxima de 39,9°C.

Figura 15 - Temperatura ao longo do dia, em cada leira, no dia de maior temperatura.



Nota 1: T1: C/N 44:1 com vinhaça; T2: C/N 44:1 com água; T3: C/N 30:1 com vinhaça; T4: C/N 30:1 com água.

Fonte: Autoria Própria (2021).

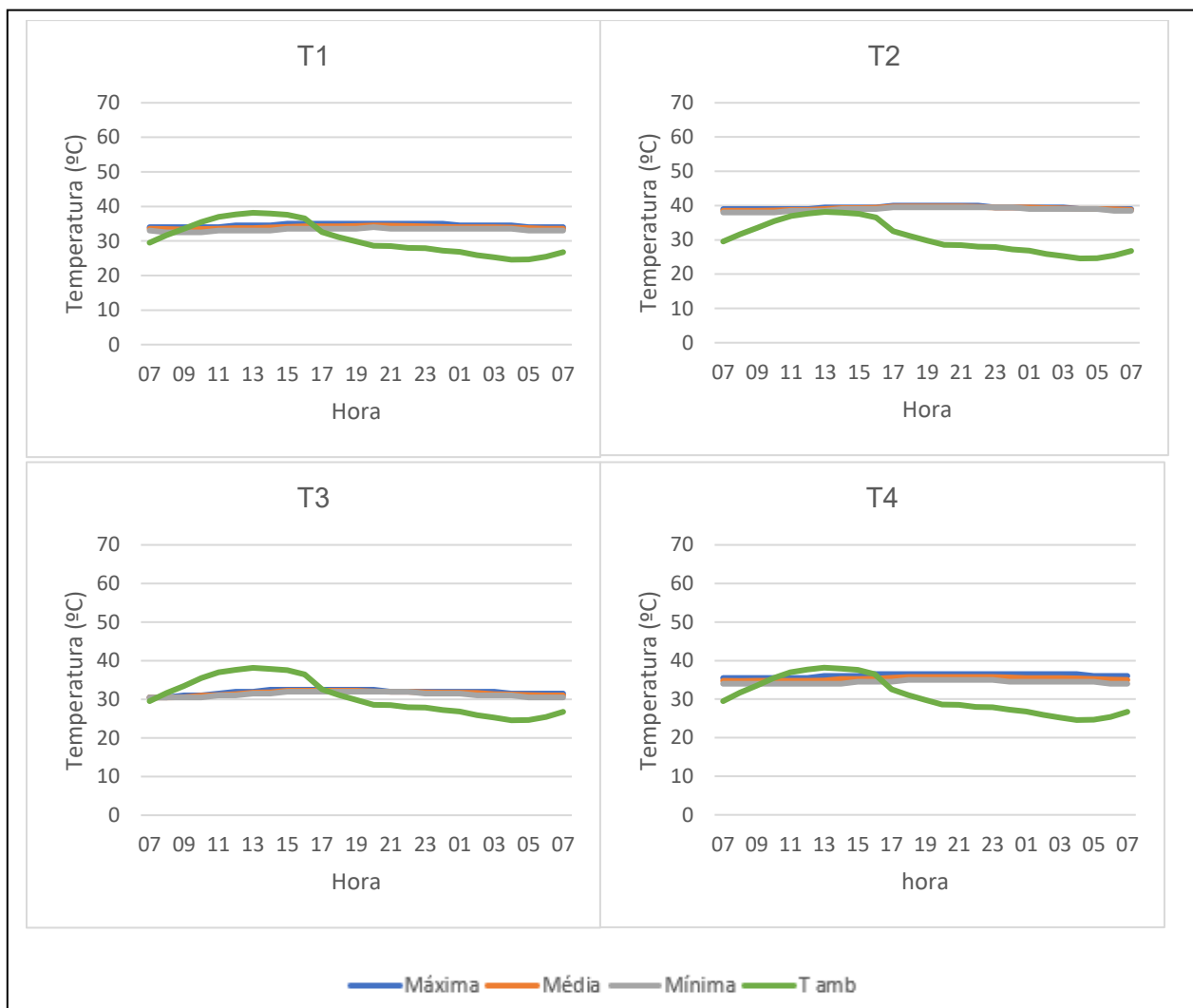
Diante do exposto, observa-se que a variação chegou a 24°C dentro de um período de 24 horas para o T3. Isso comprova a necessidade da coleta de temperatura com curtos intervalos de tempo, de modo a se obter maior representatividade (MICHELS *et al.*, 2017), auxiliando na toma de decisões futuras quanto ao manejo da compostagem.

Tais resultados também reforçam o que afirmam Dal Bosco *et al.* (2018) em pesquisa sobre a frequência ideal de coleta de dados de temperatura em resíduos no processo de compostagem. Segundo os autores, devido ao excesso de dados que podem ser obtidos quando utilizada uma frequência alta de coleta de dados, o responsável pela pesquisa deve determinar o erro máximo permitido para cada caso, já

que este erro pode estar diretamente ligado ao intervalo de coleta e ao tamanho da amostra. Isso evidencia a necessidade da coleta automatizada de dados de temperatura com menor tempo de intervalo e maior representatividade, além do planejamento acerca da hora do dia em que coletas pontuais ou manuais devem ser realizadas (MICHELS *et al.*, 2017).

Na Figura 16 é possível observar o comportamento diário nas últimas 24 horas de monitoramento do processo de compostagem.

Figura 16 - Temperatura ao longo do 60º dia de compostagem.



Nota 1: T1: C/N 44:1 com vinhaça; T2: C/N 44:1 com água; T3: C/N 30:1 com vinhaça; T4: C/N 30:1 com água.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Conforme demonstrado na Figura 16, não se observou grandes variações de temperatura ao longo do dia para todos os tratamentos e as temperaturas mínimas e máximas já não oscilavam mais, permanecendo próximas à média. Isso indica que a maior frequência de coleta de dados deve ser priorizada, quando necessário, nas fases iniciais do processo de degradação.

5.2 Carbono, Nitrogênio e Relação C/N final do composto

Na Tabela 12 apresenta-se o resultado do teor de Nitrogênio total, Carbono orgânico e relação C/N dos compostos finais após 60 dias de compostagem.

Tabela 12 – C/N inicial das leiras, Carbono orgânico, Nitrogênio total e relação C/N final nos compostos segundo os tratamentos

Parâmetro	T1	T2	T3	T4
Relação C/N inicial	43,72:1	43,72:1	30,09:1	30,09:1
Relação C/N final	16,0:1 ± 0,0	20,0:1 ± 0,0	14,5:1 ± 2,1	15,0:1 ± 1,4
Redução da C/N	63,40%	54,25%	51,81%	50,15%
Carbono Orgânico final (%)	32,825±1,916*	31,725±0,431	25,495±1,279	24,675±1,845
Nitrogênio Total final (%)	2,090 ± 0,098	1,585 ± 0,049	1,800 ± 0,197	1,660 ± 0,000

* Desvio padrão

Nota 1: T1: C/N 44:1 com vinhaça; T2: C/N 44:1 com água; T3: C/N 30:1 com vinhaça; T4: C/N 30:1 com água.

Fonte: Aatoria Própria (2021).

A concentração de N total nos quatro tratamentos do composto (T1 - C/N 44:1 com vinhaça, T2 - C/N 44:1 com água, T3 - C/N 30:1 com vinhaça e T4 - C/N 30:1 com água) ficaram entre 1,585 e 2,09, sendo que os maiores teores foram observados nos tratamentos que receberam a vinhaça como fonte de umedecimento (T1 e T3). Isso pode ter ocorrido devido à composição inicial da vinhaça apresentada na Tabela 6, que consta um valor 10 mg L⁻¹ para Nitrogênio.

Na Tabela 12 nota-se que a relação C/N teve redução de 50,15% a 62,40%, sendo observado maior percentual para os tratamentos com maior C/N inicial (44:1) e, em relação à forma de irrigação, as leiras irrigadas com vinhaça apresentaram maior porcentagem de redução em relação às leiras irrigadas com água. A evolução da relação C/N é um importante critério usado para avaliar a eficiência do processo de compostagem e estabilidade do composto. O declínio de valores iniciais no substrato próximos a 30:1 para valores finais no composto em torno de 15:1 (Tabela 12) indicam estabilização da matéria orgânica (CARICASOLE *et al.*, 2010). Os valores da relação C/N obtidos para os dois tratamentos (C/N 44:1 e C/N 30:1) variou entre 5 e 0,5, respectivamente. Ao final do período, o tratamento T2 foi aquele que apresentou relação C/N mais elevada (20:1), situando-se no limite máximo (20) considerado pelo Ministério de Agricultura como garantia para a comercialização de compostos orgânicos estáveis (MAPA, 2017). Por outro lado, Domeizel *et al.* (2004) destacam que como o valor inicial da relação C/N influencia o valor da relação C/N ao final da compostagem, esta, por si só não é suficiente para avaliar o estado de degradação do composto. Outros parâmetros, portanto, precisam ser considerados. Em relação aos demais compostos, apresentaram valores inferiores a 16:1. Nota-se, ainda, que os tratamentos que receberam água (T2 e T4) resultaram em relações C/N maiores que os que receberam vinhaça (T1 e T3). Tal resultado aponta para o possível efeito da vinhaça na mineralização da matéria orgânica em decomposição e incremento no teor de nitrogênio, visto que a vinhaça possuía 10 mg L⁻¹ de N total (Tabela 6).

5.3 pH e Condutividade Elétrica

É possível observar na Tabela 13 o pH final de cada tratamento, seguido da condutividade elétrica (CE).

Tabela 13 - Valores de pH e Condutividade Elétrica para os tratamentos

Parâmetros	T1	T2	T3	T4
pH (CaCl ₂ 0,001 mol L ⁻¹)	7,00±0,14*	7,15±0,07	7,50±0,14	7,45±0,21
Condutividade Elétrica (mS cm ⁻¹)	1,51±0,02	1,01±0,12	1,66±0,56	1,16±0,48

* Desvio padrão

Nota 1: T1: C/N 44:1 com vinhaça; T2: C/N 44:1 com água; T3: C/N 30:1 com vinhaça; T4: C/N 30:1 com água.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Os valores de pH dos tratamentos no final da compostagem se mostraram alcalinos, com valores próximos a neutralidade (pH=7) e superiores aos resíduos inicialmente adicionados ao processo, que possuíam caráter ácido (Tabela 5). Ao compostar resíduos vegetais, lodo de esgoto e podas de árvores, Reis (2005) também observou que o pH final do composto chegou próximo a 7, o que indica a neutralização dos resíduos que, *in natura*, possuíam caráter ácido. Além disso, nota-se que o T1, que recebeu vinhaça como fonte de umedecimento, apresentou valor de pH menor que T2. Tal fato pode estar associado ao pH da vinhaça, que era de 4,47 (Tabela 6). Por outro lado, tal comportamento não foi observado para os tratamentos com relação C/N de 30:1.

De acordo com o MAPA (2020), é necessário que o pH do composto final seja de no mínimo 6, ou seja, todos os tratamentos estão de acordo com a Instrução Normativa 61/2020 segundo este parâmetro.

Outro parâmetro a ser analisado é a CE, que representa a presença de sais no composto final. Segundo Sharma *et al.* (1997), valores entre 0,64 e 6,85 mS cm⁻¹ são considerados normais para uso de resíduos em áreas agrícolas. Já Kiehl (1998) afirma que a CE dos compostos orgânicos não deve ser superior a 4 mS cm⁻¹. A CE aumentou em relação às análises dos resíduos (Tabela 5). Paredes *et al.* (2001) explicam que a produção de compostos inorgânicos como resultado da degradação da matéria orgânica e o aumento da concentração de íons devido à perda de massa da pilha acarreta o aumento da CE. Nota-se também (Tabela 13) que os tratamentos que receberam vinhaça, como fonte de umedecimento, resultaram em valores mais elevados de CE. Isso pode estar associado à CE da vinhaça que era de 2,536 mS cm⁻¹ (Tabela 6).

5.4 Caracterização química dos compostos ao final do processo e seu enquadramento segundo a legislação

Na Tabela 14 estão apresentados os valores que devem ser respeitados para enquadramento como “Fertilizante orgânico misto ou composto” segundo MAPA (2020), quanto aos parâmetros: Umidade, Nitrogênio Total, Carbono Orgânico, pH, relação C/N, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio, Enxofre, Ferro, Manganês, Cobre, Zinco e Boro.

Tabela 14 - Resultados da caracterização do composto final de cada tratamento.

Tratamento	Garantia ¹	T1	T2	T3	T4
pH final (CaCl ₂ 0,001 mol L ⁻¹)	6	7,000±0,141	7,150±0,070	7,500±0,141	7,450±0,212
Condutividade Elétrica (mS cm ⁻¹)	-	1,510±0,282	1,010±0,127	1,660±0,565	1,160±0,48
Umidade (%)	<50,00	71,145±2,694	70,945±0,657	61,940±3,719	64,105±2,439
Carbono Orgânico Final (%)	15,00	32,825±1,916	31,725±0,431	25,495±1,279	24,675±1,845
Nitrogênio Total Final (%)	>0,50	2,090±0,098	1,585±0,049	1,800±0,197	1,660±0,00
Fósforo (P ₂ O ₅) (%)	>1,00	1,015±0,077	0,835±0,007	1,220±0,000	1,200±0,197
Potássio (K ₂ O) (%)	>1,00	0,970±0,014	0,330±0,042	0,740±0,127	0,240±0,056
Cálcio (%)	>1,00	0,970±0,084	1,005±0,035	1,130±0,028	0,970±0,197
Magnésio (%)	>1,00	0,400±0,014	0,350±0,014	0,435±0,007	0,340±0,000
Enxofre (%)	>1,00	0,035±0,007	0,015±0,000	0,040±0,014	0,030±0,000
Cobre (%)	>0,02	0,012±0,001	0,013±0,000	0,0143±0,003	0,017±0,001
Ferro (%)	>0,02	0,246±0,017	6,280±0,144	8,786±0,402	6,089±4,441
Manganês (%)	>0,02	0,082±0,004	0,092±0,003	0,117±0,001	0,113±0,002
Zinco (%)	>0,10	0,012±0,001	0,012±0,002	0,017±0,000	0,017±0,001
Boro (%)	>0,01	0,000±0,000	0,000±0,000	0,000±0,000	0,000±0,000
Relação C/N	<20	16,000±0,000	20,000±0,000	14,500±2,121	15,000±1,414

Nota 1: os valores apresentados nesta coluna representam o que está preconizado na IN 61/2020 (MAPA, 2020); deste modo, valores em verde, na Tabela, simbolizam o atendimento a IN 61/2020 (MAPA, 2020) e valores em vermelho simbolizam o não atendimento.

Nota 2: T1: C/N 44:1 com vinhaça; T2: C/N 44:1 com água; T3: C/N 30:1 com vinhaça; T4: C/N 30:1 com água.

Fonte: Autoria Própria (2021).

É possível observar na Tabela 14 que os tratamentos estudados atenderam aos parâmetros estabelecidos pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2020) no que se refere ao Carbono orgânico, Nitrogênio total, Ferro, Manganês e Boro. O teor mínimo de Fósforo não foi atendido pelo T2 e o de Cálcio pelo T1 e T4.

Os tratamentos T1 e T3 apresentaram porcentagens maiores de Potássio comparados aos tratamentos T2 e T4. Isso pode ter ocorrido devido à quantidade de K_2O presente na vinhaça utilizada para o umedecimento desses tratamentos, visto que o teor de Potássio deste efluente era de $347,80 \text{ mg L}^{-1}$ conforme a Tabela 6.

Para fins de comercialização dos compostos obtidos, parâmetros como P_2O_5 , K_2O , Cálcio, Magnésio, Enxofre, Cobre, Ferro, Zinco e Boro, precisariam de correção e, quanto à umidade, salienta-se que é possível sua correção por meio da realização de revolvimentos antes da sua disposição final.

5.5 Redução de Massa e Volume

He, Logan e Traina (1995) afirmam que há uma considerável redução de volume e peso específico na compostagem em relação aos resíduos colocados inicialmente no processo. O CO_2 liberado neste processo e a degradação do material resultam nesta redução de volume e da massa do composto (SILVA, 2007).

Os dados de redução de massa úmida e seca e de volume podem ser observados na Tabela 15.

Tabela 15 - Redução de massa úmida, massa seca e volume.

Tratamento	% redução de massa úmida	% de redução de massa seca	% redução de volume
T1	47,3% ± 1,89*	38,86% ± 2,07	60,0% ± 5,65
T2	51,5% ± 2,06	42,16% ± 6,10	72,0% ± 5,65
T3	31,0% ± 2,04	37,27% ± 0,73	48,0% ± 0,00
T4	38,5% ± 4,00	43,26% ± 1,57	62,0% ± 2,82

* Desvio padrão

Nota 1: T1: C/N 44:1 com vinhaça; T2: C/N 44:1 com água; T3: C/N 30:1 com vinhaça; T4: C/N 30:1 com água.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Pode-se observar na Tabela 15 que houve redução de massa úmida, massa seca e de volume em todos os tratamentos. A maior redução de volume e massa seca foi observada no Tratamento T2, enquanto a maior redução de massa seca foi observada no T4. Nota-se ainda que os tratamentos com vinhaça (T1 e T3) resultaram em menores reduções de massa úmida, massa seca e volume quando comparados aos tratamentos irrigados com água (T2 e T4).

O grande potencial de redução de massa e volume era esperado, visto que se relata, na literatura, que os resíduos orgânicos em processo de compostagem tendem a diminuir seu volume em aproximadamente 50% (KIEHL, 1985). Do ponto de vista prático e de logística, tais resultados podem implicar em economia com o transporte para a destinação dos resíduos da Usina em questão, visto que a compostagem permitiu a redução na faixa de 48 a 72% do volume. Além do aspecto econômico, deve-se destacar a redução de mão-de-obra, equipamentos e emissão de gases de efeito estufa em virtude da movimentação de máquinas.

Quanto à massa seca, observou-se (Tabela 15) uma redução maior nos tratamentos que foram irrigados com água, com 42,16% de redução pra T2 e 43,26% para T4. Oliveira (2014), ao compostar algodão, poda urbana, serragem, bagaço de cana-de-açúcar e capim Napier obteve reduções de 50,1 a 65,4% em massa seca, valores superiores aos observados na presente pesquisa.

Na Tabela 16 é possível observar o resultado do teste de comparação de médias de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância, dos tratamentos que receberam água e vinhaça durante o processo de compostagem.

Tabela 16 - Resultado do Teste de Scott-Knott para perda de massa úmida (%) e redução de volume (%) entre os tratamentos com água e vinhaça

Tratamento	Perda de Massa Úmida (%)	Perda de Massa Seca (%)	Perda de Volume (%)
Vinhaça	39,50a ± 7,87	38,06a ± 3,83	54,00a ± 8,32
Água	45,00a ± 9,39	42,93a ± 1,07	67,00b ± 37,99

Nota: Médias seguidas de letras iguais, não diferem estatisticamente, a 5% de significância.

* Desvio padrão

Fonte: Autoria Própria (2021).

Pode-se notar pela Tabela 16 que a perda de massa úmida e seca não resultou em diferença estatística (ao nível de 5% de significância) entre os tratamentos que receberam água ou vinhaça e isso pode estar associado ao volume padronizado de água/vinhaça adicionado às leiras. Já o volume foi influenciado: os tratamentos irrigados com água tiveram maior redução.

Na Tabela 17 é possível verificar o teste de comparação de médias para as duas relações C/N iniciais.

Tabela 17 - Teste de Scott-Knott para Perda de Massa (%) e Redução de Volume (%) nos tratamentos com relação C/N 30:1 e 44:1.

Tratamento	Perda de Massa Úmida (%)	Perda de Massa Seca (%)	Perda de Volume (%)
Relação 30:1	35,00a ± 4,69*	40,26a ± 5,02	55,00a ± 8,86
Relação 44:1	49,50b ± 2,88	40,73a ± 2,51	66,00a ± 7,65

Nota: Médias seguidas de letras iguais, não diferem estatisticamente, a 5% de significância.

* Desvio padrão

Fonte: Autoria própria (2021).

Nota-se que os tratamentos com relação C/N inicial de 44:1 resultaram em maior perda de massa úmida, enquanto para redução e massa seca e volume não houve diferença significativa entre as relações C/N iniciais. A maior perda de massa úmida dos tratamentos com relação C/N inicial de 44:1 pode estar associada à granulometria do bagaço, resíduo predominante nas leiras. Por ser um resíduo poroso, pode ter favorecido a evaporação e absorvido menos a água/ a vinhaça no momento da irrigação.

5.6 Aspecto e descaracterização do material

Na Figura 17 observa-se os registros fotográficos dos resíduos no dia da montagem das leiras.

Figura 17 - Registros fotográficos de cada resíduo antes do processo de compostagem.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Na Figura 18 apresenta-se as leiras de compostagem depois do seu primeiro revolvimento. É perceptível a diferença de coloração do material nas superfícies das leiras de tratamentos T1 e T2 em comparação aos tratamentos T3 e T4. Isso pode ter ocorrido devido à maior quantidade de torta de filtro que já é um resíduo de coloração escura, e conseqüentemente a menor relação C/N advindas dos tratamentos de relação C/N de 30:1, cuja predominância era da torta de filtro.

Figura 18 - Registro fotográfico das leiras depois do primeiro revolvimento

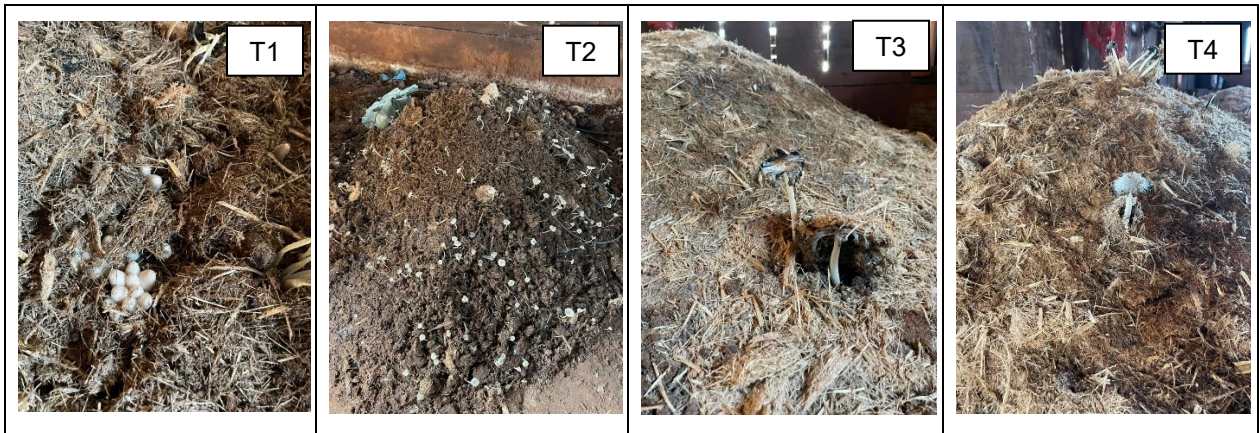


Nota 1: T1: C/N 44 com vinhaça; T2: C/N 44 com água; T3: C/N 30 com vinhaça; T4: C/N 30 com água.

Fonte: Autoria Própria (2021).

É possível observar na Figura 18 que surgiram espécies diferentes de fungos depois dos revolvimentos em todas as leiras. Isso pode ter ocorrido devido aos valores de pH estar dentro da faixa de desenvolvimento de tais organismos ($\text{pH} < 5$) (FIALHO, 2007) e as temperaturas das leiras terem aumentado em decorrência dos revolvimentos.

Figura 19 - Leiras apresentando diferentes tipos de fungos.

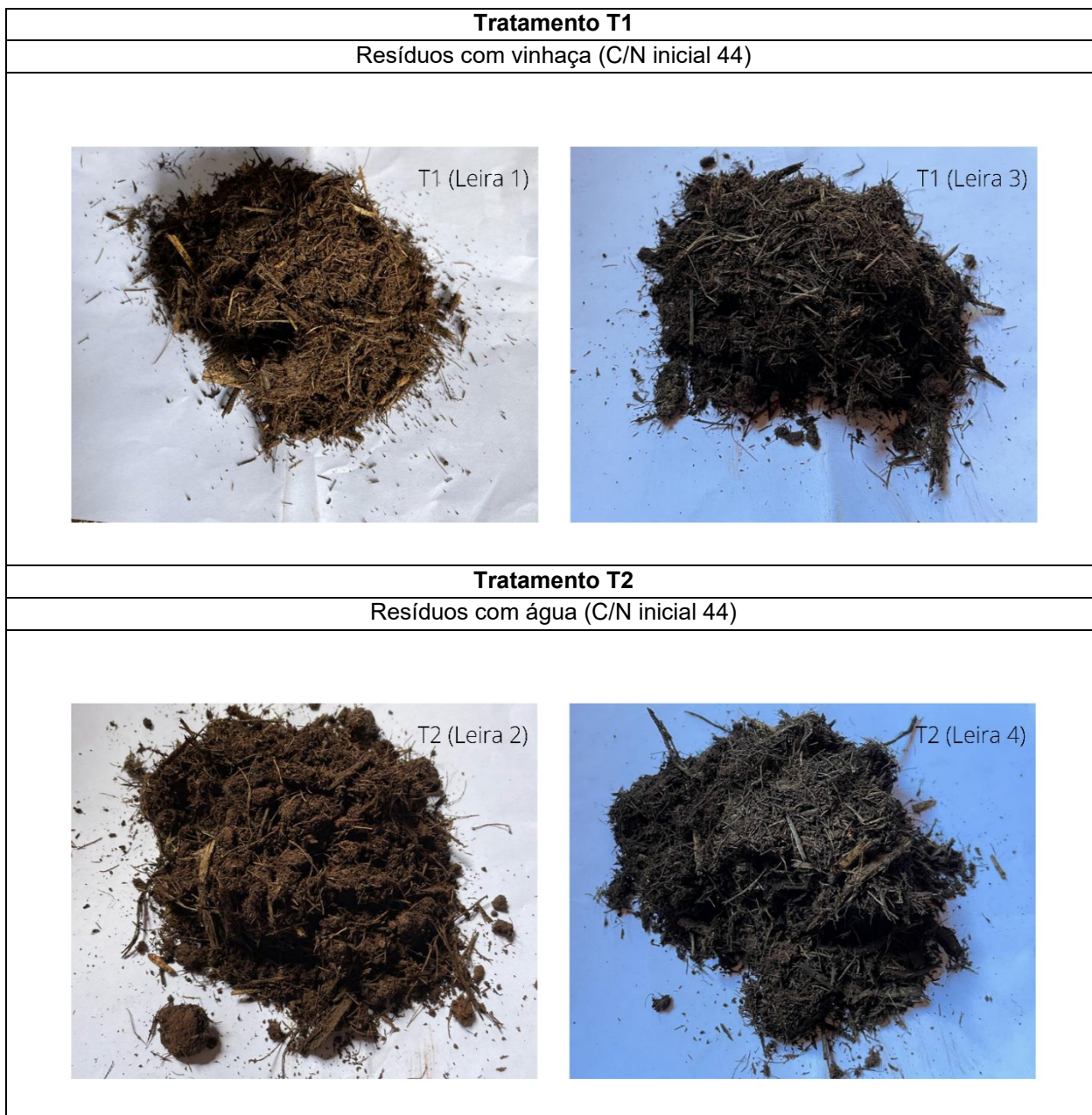


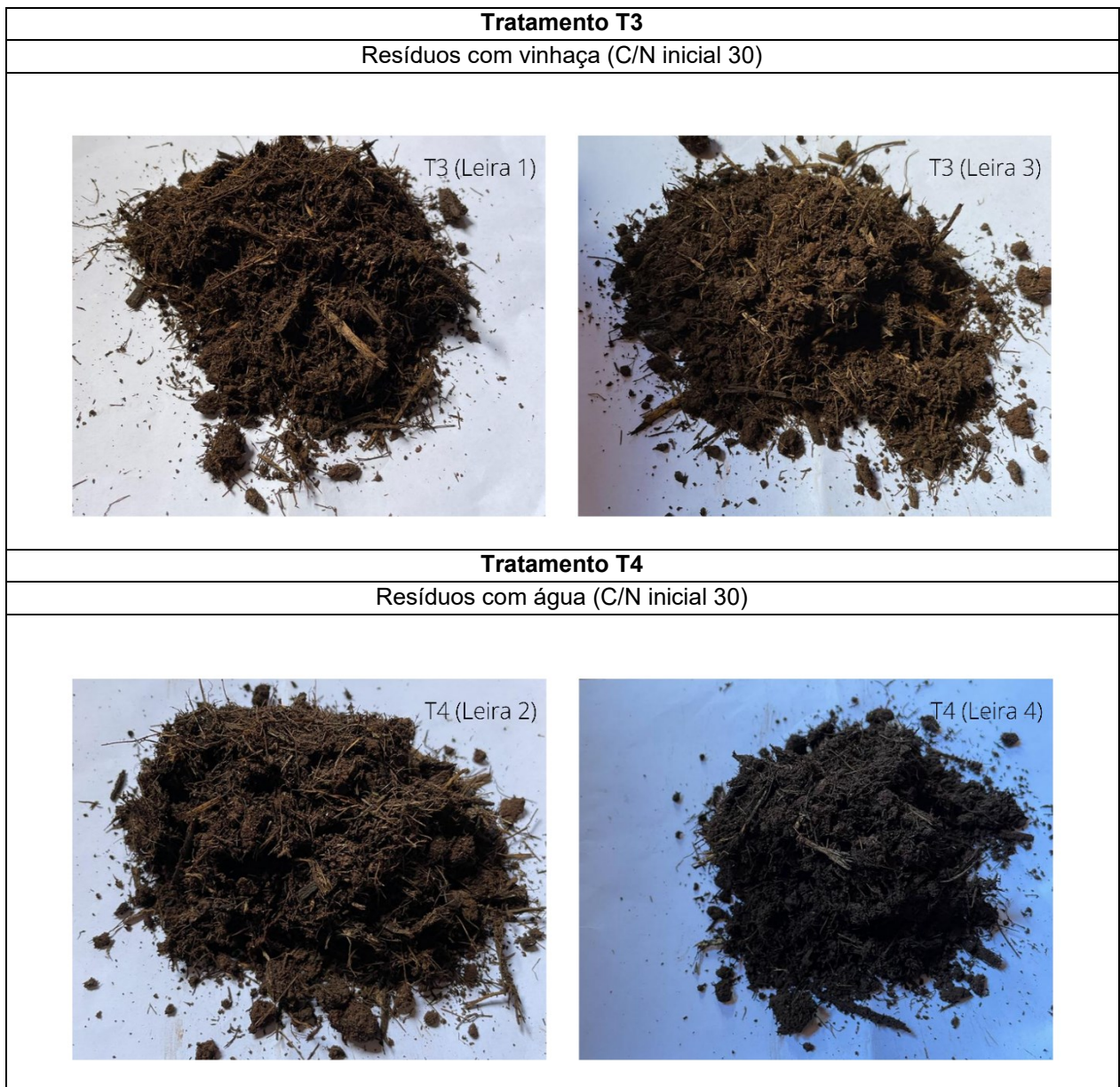
T1: C/N 44 com vinhaça; T2: C/N 44 com água; T3: C/N 30 com vinhaça; T4: C/N 30 com água.

Fonte: Autoria Própria (2021).

Na Figura 20 são apresentadas fotografias do aspecto dos compostos ao final do processo, 60 dias após o início da compostagem.

Figura 20 - Registros fotográficos dos compostos ao final da compostagem.





Fonte: Autoria Própria (2021).

Nota 1: T1: C/N 44 com vinhaça; T2: C/N 44 com água; T3: C/N 30 com vinhaça; T4: C/N 30 com água.

Os compostos das leiras com relação C/N 30:1 eram, visualmente, mais úmidos e com seus grãos mais unidos, confirmando os dados apresentados na seção 5.4 Já as leiras com relação C/N 44:1 eram, visivelmente mais secos.

Todos os compostos apresentaram coloração, textura e granulometria diferentes das características do material de origem, tal qual caracterizado por Kiehl (2004). Assim,

no final do processo, não foi mais possível distinguir os resíduos que foram, inicialmente, colocados nas leiras.

6 CONCLUSÕES

- A temperatura das leiras dos tratamentos com relação C/N inicial 30:1 demorou mais tempo para atingir a máxima na fase de aquecimento, porém, os tratamentos T1 e T2 (relação C/N inicial 44:1 irrigados com vinhaça e água, respectivamente) permaneceram por mais tempo com temperaturas mais elevadas que os tratamentos T3 e T4 (relação C/N inicial 30:1 irrigados com vinhaça e água, respectivamente). Assim, todos os tratamentos atingiram temperatura e tempo de permanência que garantem a sanitização do composto.

- A variação da temperatura ao longo do dia chegou a 24°C, para o T3, no 21º dia da compostagem. Isso ressalta a importância do monitoramento frequente deste parâmetro em processos de compostagem.

- A redução da massa úmida dos tratamentos T3 e T4 foi aproximadamente 10% menor que a redução dos tratamentos T1 e T2. A maior redução em massa úmida e em volume foi a do tratamento T2, com 51,5% de redução de massa úmida e 72% de redução em seu volume, o que do ponto de vista prático o torna um tratamento interessante para aplicação em larga escala.

- No que diz respeito à redução de massa úmida e volume os tratamentos irrigados com água tiveram maior redução média de volume, enquanto os tratamentos com relação C/N inicial de 44:1 apresentaram maior redução de massa úmida. Já em termos de redução de massa seca não houve diferença significativa entre os tratamentos com diferentes fontes de umedecimento e nem relações C/N iniciais.

- O tratamento T1 e T3, umedecidos com vinhaça, sofreram maior influência dos revolvimentos e umedecimentos ocasionando picos de temperaturas máximas, provavelmente devido ao acréscimo de matéria orgânica facilmente decomposta advinda da vinhaça.

- Em relação aos aspectos agronômicos, a relação C/N final dos compostos variou de 14,5:1 (T3) a 20:1 (T2) e todos os tratamentos atenderam aos critérios preconizados pela IN 61/2020 do MAPA no que se refere ao Carbono orgânico, Nitrogênio total, Ferro, Manganês e Boro. Os demais parâmetros requerem correção.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.
- _____. NBR 10007: resíduos sólidos: amostragem. São Paulo, 2004b.
- ALCARDE, J.C. **Manual de Análise de Fertilizantes**. Piracicaba: FEALQ, 2009. 259 p
- ALVES, D. R.; ABDALLA, M. G.; LIMA, A. F. **Aplicação da torta de filtro como adubo em canaviais**. 2017.
- ANDREOLI, C. V. *et al.* **Higienização do Lodo de Esgoto – Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. In: Andreoli, C. V. Lodo de Esgoto. Rio de Janeiro: ABES, 2001.
- APHA. AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20 ed. Washington: American Public Health Association, 1999.
- APHA. AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012.
- APHA. AWWA, WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23 ed. Washington: American Public Health Association, 2017.
- BARREIRA, L. P. **Avaliação das usinas de compostagem do estado de São Paulo em função da qualidade dos compostos e processos de produção**. 2005. 204f. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- BARROS, R. P. de; VIÉGAS, P. R. A.; SILVA, T. L. da; SOUZA, R. M. de; BARBOSA, L.; VIÉGAS, R. A.; BARRETTO, M. C. de V.; MELO, A. S. de. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 40, n. 3, p. 341–346, 2010. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/pat/article/view/6422>. Acesso em: 13 nov. 2021.
- BATISTA, J.G.F.; BATISTA, E.R.B. **Compostagem**: Utilização de compostos em horticultura. Universidade dos Açores - Centro de Investigação e Tecnologias Agrárias dos Açores, 2007.
- BERNAL, M. P.; SÁNCHEZ–MONEDERO, M. A.; PAREDES, C.; ROIG, A. Carbon mineralization from organic wastes at different composting stages during their incubation with soil. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 69, p. 175-189, 1998a.
- BERNARDINO, Cassiano A. R. *et al.* Torta de Filtro, Resíduo da Indústria Sucroalcooleira - Uma Avaliação por Pirólise Lenta. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 3, p. 1-23, 26 jun. 2016. Disponível em:

<http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/BernardinoNoPrelo.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2021.

BIDONE, F.R.A.; POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos: EESC/USP, Projeto REENGE, 1999.

BIOSUL. **Dados de produção por safra e produto desde 1978 em MS**. Disponível em: <http://biosulms.com.br/estatistica/historico-de-producao-em-ms/>. Acesso em: 07 jul. 2021.

BORRERO, M.A.V.; J.T.V. PEREIRA; E.E. MIRANDA. (2003). An environmental management method for sugar cane alcohol production in Brazil – **Biomass & Energy** 25 p. 287-299.

CANILHA, L.; CARVALHO, W.; ROCHA, G.J.M.; ALMEIDA E SILVA, J.B.; GIULIETTI, M. **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar in natura, extraído com etanol ou ciclohexano/etanol**. 47º Congresso Brasileiro de Química, Natal - RN, 17 a 21/09/2007. Disponível em: <http://www.abq.org.br/cbq/2007/trabalhos/11/11-570-713.htm>. Acesso em: 16 out. 2021.

CARICASOLE, P.; PROVENZANO, M. R.; HATCHER, P. G.; SENESI, N. **Evolution of organic matter during composting of different organic wastes assessed by CPMAS 13C NMR spectroscopy**. Waste Management, Bethesda, USA, v. 31, n. 3, p. 411-415, 2010.

CHACÓN, E. A. V; Mendonça, E. S.; Silva, R. R.; Lima, P. C.; Cantarutti, R. B. Decomposição de fontes orgânicas e mineralização de formas de nitrogênio e fósforo. **Revista Ceres**. 2011, 58, 373. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/ywmvXtcPN8CZhHvfj9rC4mJ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 07 jul. 2021.

CIRCULAR, Fundación Economía. Economía circular. **Recuperado**, v. 15, 2017.

COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. M.; LORA, B. A.; MONTEIRO, M. B. C. A.; GORREN, R. **A sustentabilidade de expansão da cultura canavieira**. Cadernos Técnicos da Associação Nacional de Transportes Públicos, São Paulo, v. 6, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Série Histórica das Safras**. Brasília: 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 20 Ago. 2021.

CONAB, 2020 Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v.7 –Brasília: Conab, 2020. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. ISSN 2318-7921.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Nº 420**, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasil, 2009.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Nº 481**, de 03 de outubro de 2017. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Brasil, 2017.

CORRÊA, D.; PRESSI, F. P.; JACOMETTI, M. L. G.; SPITZNER JR., P. I.; PAREDES, E. A. Tecnologia de fabricação de fertilizantes orgânicos. In: CERRI, C. C.; ATHIÉ, D.. The regional colloquium on soil organic matter studies. **Proceedings...** São Paulo, 1982, p.217-222.

CORTEZ, L; MAGALHÃES, P.; HAPP, J. Principais subprodutos da agroindústria canieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, v.2, p.111-146, 1992.

CTPS. Green Line Extension New Starts Analysis. **Central transportation planning staff regional travel demand modeling**. Boston: Central Transportation Planning Staff, 2013.

DAL BOSCO, T. C. *et al.* (2017). **Compostagem e vermicompostagem de resíduos sólidos**. Documento eletrônico. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/livro/detalhes/compostagem-e-vermicompostagem-de-residuos-solidos-1260/meio-ambiente-315>. Acesso em: 07 dez. 2021.

DAL BOSCO, T.C. *et al.* (2018): The ideal frequency of temperature data collection in compostability experiments on domestic organic residues, **Environmental Technology**, DOI: 10.1080/09593330.2018.1523233

DE ANDRADE, E. T.; DE CARVALHO, S. R. G.; DE SOUZA, L. F. Programa do Proálcool e o etanol no Brasil. **Engevista**, 2009.

DIAS, R. (2011). *Gestão Ambiental: Responsabilidade Social e Sustentabilidade*. São Paulo: Editora Atlas.

DOELSCH, E.; MASON, A.; CAZEVIEILLE, P.; CONDOM, N. Spectroscopic characterization of organic matter of a soil and vinasse mixture during aerobic or anaerobic incubation. **Waste Management**, v.29, p.1929–1935, 2009.

DOMEIZEL, M.; KHALIL, A.; PRUDENT, P. **UV spectroscopy: a tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost**. *Bioresource Technology*, Inglaterra, v. 94, p. 177–184, 2004.

ECN database. Sugarcane bagasse #894. 2018. Disponível em <https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis###894>. Acesso em: 19 out. 2021.

EPSTEIN, E. **Industrial Composting: Environmental Engineering and Facilities Management**. Taylor and Francis, 2011.

_____. (ESTADO). Lei Nº. 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar. Acesso em: 20 Ago. 2021.

FAPESP (Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de São Paulo). 1998. Propriedades do bagaço da cana-de-açúcar. *Revista Pesquisa FAPESP*, edição 30, abril 1998.

FEBRER, M. C. A. Dinâmica da decomposição mesofílica de resíduos orgânicos misturados com águas residuárias da suinocultura. *Engenharia na Agricultura, Viçosa*, v.10, n.1-4, p.18-30, 2002.

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

FERRAZ, J. M. G.; PRADA, L. DE S.; PAIXÃO, M. **Certificação socioambiental do setor sucroalcooleiro**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 195p

FERREIRA, B. S.; THOMAZ, A. G. B.; GALLI, L. C. L. A.; LOUZADA, R. (2016). Gestão Ambiental Empresarial: um estudo do gerenciamento de resíduos em uma empresa de Franca/SP. **Anais do I Simpósio em Gestão do Agronegócio**, Jaboticabal, SP, Brasil.

FERREIRA, B. S.; THOMAZ, A. G. D. B.; REBELATO, M. G. Gerenciamento de Resíduos em uma Indústria Sucroenergética: Um Estudo de Caso. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETO, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADES, 5., 2016, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Singep, 2016. p. 1-15. Disponível em: <http://www.singep.org.br/5singep/resultado/644.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2021.

FRAVET, P. R. F.; SOARES, R. A. B.; LANA, R. M. Q.; LANA, Â. M. Q.; KORNDÖRFER, G. H. Efeito de doses de torta de filtro e modo de aplicação sobre a produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar. In: EDITORA DA UFLA, 34., 2010, Lavras. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras: Fapunifesp (SciELO), 2010. p. 618-624.

GARG, P.; GUPTA, A.; SATYA, S.; **Bioresour. Technol.** 2006, 97, 391.

GEMTOS, T. A.; CHOULIARAS, N.; MARAKIS, S. Vinasse rate, time of application and compaction effect on soil properties and durum wheat crop. **Journal of Agriculture and Engineering Research**, v.73, n.3, p.283-296, 1999.

GOMES, T. C. A. **Resíduos orgânicos no processo de compostagem e sua influência sobre a matéria orgânica do solo em cultivo de cana-de-açúcar**. 2011. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência do Solo, Universidade Federal Rural de

Pernambuco, Recife, 2011. Disponível em:
<http://santaines.ufrpe.br/pgs/portal.bak/files/teses/2011/TamaraClaudiadeAraujoGomes.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2021.

GOMES, T.C. A. Reciclagem de vinhaça por meio do processo da compostagem. **Embrapa Tabuleiros Costeiros-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2012.

GOMES, T. C. A.; ARAÚJO, J. L. P.; SANTOS, T. A.; MELO, P. L. A.; DE OLIVEIRA PEREIRA, K. T., DA COSTA JÚNIOR, J. C.; DOS SANTOS, T. C. **Reciclagem de vinhaça via compostagem em larga escala**. 2018.

HE, X. T.; LOGAN, T. J.; TRAINA, S. J. Physical and chemical characteristics of selected U. S. municipal solid waste composts. **Journal of Environmental Quality**, v. 24, p. 543-552, 1995.

INÁCIO, C. T.; MILLER, P. R. M. **Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2009. 156 p.

JABBOUR, A.B.L., JABBOUR, C.J.C., SARKIS, J. *et al.* Brazil's new national policy on solid waste: challenges and opportunities. **Clean Techn Environ Policy** 16, 7–9 (2014). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0600-z>. Acesso em: 20 ago. 2021.

JACOME, D. L. F. **Avaliação das características físico-químicas das cinzas de bagaço e palha da cana-de-açúcar**. Tese de doutorado - Campinas: UNICAMP, 2018.

JORDÃO, C. O.; MORETTO, E. M. The environmental vulnerability and the territorial planning of the sugarcane cultivation. **Ambiente & Sociedade**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 75-92, mar. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc675v1812015en>.

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

KIEHL, E.J. **Manual da Compostagem: Maturação e Qualidade do Composto**. 3ª ed. Piracicaba, 173p. 2002.

KIEHL, E.J. **Manual da Compostagem: Maturação e Qualidade do Composto**. 4ªed. Piracicaba. 173p. 2004.

KOMATSU, R. K.; DOS SANTOS, C. H. P.; DE SOUSA, J. C. Gestão de Resíduos: hábitos de descarte de resíduos derivados da produção agrícola das propriedades em assentamentos rurais/Waste Management: Waste Disposal Habits from Agricultural Production of Properties in Rural Settlements. **Revista de Psicologia**, v. 13, n. 44, p. 700-722, 2019.

LEAL, M. A. A. **Produção e eficiência agrônômica de compostos obtidos com palhada de gramínea e leguminosa para o cultivo de hortaliças orgânicas**. 2006. 133 f. Tese (Doutorado em Ciência em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

LIMA, C. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; SILVA, L. H. M.; ROIG, A. **Caracterização química de resíduos da produção de biodiesel compostados com adição mineral**. Engenharia Agrícola e Ambiental 2009, 13, 334. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/WsMd8cCWZzxQ5tsQgt8gZq/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 06 jul. 2021.

LIMA JUNIOR, R.G.S. et al. **Avaliação de novas práticas de compostagem em pequena escala com aproveitamento energético**. Engenharia Sanitária e Ambiental. v.22, n.2, 2017.

MANHÃES, M. S. Compostagem de resíduos agroindustriais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 12, p. 1357-1361, 1993.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **“Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos”**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília-DF. 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**. Diário Oficial da União República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 8 jul. 2020.

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

MATOS, A. T.; VIDIGAL, S. M.; SEDIYAMA, M. A.; GARCIA, N.C.P.C.; RIBEIRO, M. F. Compostagem de alguns resíduos orgânicos, utilizando-se águas residuárias da suinocultura como fonte de nutrientes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.2, p.199-203, 1998.

MICHELLON, E.; SANTOS, A. A. L.; RODRIGUES, J. R. A. Breve descrição do PROÁLCOOL e perspectivas futuras para o etanol produzido no Brasil. In: Congresso Da Sociedade Brasileira De Economia, Administração e Sustentabilidade, 46., 2008, Rio Branco. **Congresso**. Rio Branco: Sober, 2008. v. 46, p. 1-16.

MICHELS, R. N. et al. **"Importância da automação e da estatística no processo de compostagem"**, p. 241 -254. In: DAL BOSCO, T. C. Compostagem e vermicompostagem de resíduos sólidos: resultados de pesquisas acadêmicas. São

Paulo: Blucher, 2017.

Moura, Elda Marra de *et al.* Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-cimento. **Ambiente Construído** [online]. 2021, v. 21, n. 1., pp. 69-80. ISSN 1678-8621. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100494>. Acesso em: 14 nov 2021

Neves, M. C. P.; Lima, I. T.; Dobereiner, J. **Efeito da vinhaça sobre a microflora do solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.7, p.131-136, 1983.

NOEL, F. L. Etanol: o desafio do combustível verde. **Problemas Brasileiros**, São Paulo, n. 382, jul/ago 2007.

NOVA CANA. **As usinas de Açúcar e Etanol do Brasil**. 2021. Disponível em: https://www.novacana.com/usinas_brasil. Acesso em: 07 jul. 2021.

NOVA CANA. **Como garantir a máxima extração de açúcar?** 2019. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/informe-publicitario/como-garantir-a-maxima-extracao-de-acucar>. Acesso em: 24 jul. 2021.

Nunes, I.H.S.; Vanderlei R.D.; Secchi M. and Abe MAP. Estudo das características físicas e químicas do bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. **Revista Tecnológica**. 2009; (17):39-48.

NUNES JÚNIOR, D. Torta de filtro: De resíduo a produto nobre. **Revista Idea News**, n.92, p.22-30, 2008.

OLIVEIRA, E. C. A.; SARTORI, R. H.; GARCEZ, T. B. **COMPOSTAGEM**. 2008. 19 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Compostagem_000fhc8nfqz02wyiv80efhb2adn37yaw.pdf. Acesso em: 15 ago. 2021.

PAREDES, C.; BERNAL, M. P.; ROIG, A.; CEGARRA; J. **Effects of olive mill wastewater addition in composting of agroindustrial and urban wastes**. Biodegradation, Dordrecht, NL, v. 12, p. 225–234, 2001.

PAULINO, A. F.; Medina, C. C.; Robaina, C. R. P.; Laurani, R. A. Produções agrícola e industrial de cana-de-açúcar submetida a doses de vinhaça. **Ciências Agrárias**, v. 23, n. 2, p. 145-150, 2002.

PEDROSA, T.D. et al. **Monitoramento dos parâmetros físico-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais**. Nativa: Pesquisas Agrárias e Ambientais. 2013.

PEIXOTO, G. T. **Compostagem de lodo de curtume com poda de**

árvore, maravalha e cinza de caldeira em duas condições de relação C/N inicial. 2018. 73 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental). – Curso de Engenharia Ambiental – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2018.

PEIXOTO, J. O. **Destinação final de resíduos, nem sempre uma opção econômica.** Engenharia Sanitária, (1): 15-18, 1981.

PEIXOTO R. T. G. (1988). **Compostagem: Opção para manejo orgânico do solo.** IAPAR, Londrina, PR, 15 p.

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

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de Compostagem: Processo de baixo custo.** Viçosa: UFV, 2007. 81 p.

PEREIRA NETO, J.T. **Monitoramento da eliminação de organismos patogênicos durante a compostagem de resíduos urbanos e lodo de esgoto pelo sistema de pilhas estáticas aeradas.** Engenh. Sanit., 27: 148-152. 1988.
Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Lei nº 12.305 de 02 de Agosto de 2010. Diário Oficial da União: Brasília.

RAMOS, R. C.; Nachiluk, K. **Diagnóstico do Setor Sucroenergético em 2014.** Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=13797>. Acesso em: 20 jul. 2021.

REGAZZINI, L. C.; BACHA, C. J. C. A tributação no setor sucroenergético do estado de São Paulo: anos de 2000 e 2008. **Revista de Economia e Sociologia Rural** [online]. 2012, v. 50, n. 4. ISSN 1806-9479 Acesso em: 14 Jul 2021, pp. 801-818. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-20032012000440012>.

REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M. (2014). Avaliação do desempenho ambiental dos processos industriais de usinas sucroenergéticas: um estudo na Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu. **Revista de Administração da UNIMEP**, 12 (3). ISSN: 1679-5350.

REIS, Mariza Fernanda Power. **Avaliação do Processo de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos.** 2005. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

RODRIGUES, M.S. *et al.* **Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos.** IN: SPADOTTO, C.A.; RIBEIRO, W. Gestão de Resíduos na agricultura e agroindústria. FEPAF. Botucatu. p. 63-94. 2006.

RODRIGUES, V. C. *et al.* **Produção de Minhocas e Composição Mineral do Vermicomposto e das Fezes Procedentes de Bubalinos e Bovinos.** Ciência e

Agrotecnologia, v.27, n.6, p.1449-1418, 2003.

SALOMOM, K. R.; LORA, E. E. S. (2009). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass & Bioenergy**, 33, pp. 1101-1107.

SANTA CRUZ, L. F. L.; DUARTE, C.G.; MALHEIROS, T. F.; PIRES, E. C. Análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça: fertirrigação, concentração e biodigestão. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, n. 29, p. 111-127, 2013.

SANTOS, D. H.; SILVA, M. DE A.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; ECHER, F. R. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.443-449, 2011.

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

SHARMA, Vinod Kumar. Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: Review. **Energy Conservation Manag**, v. 38, nº3, p. 453-478, dez 1997.

SILVA, A. P. M.; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. In: REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL, 1., 2013, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2013. v. 18, p. 38-43. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/YSZnrzRVh39DRYz4KmpWSFg/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 04 ago. 2021.

SILVA, C. D.; COSTA, L. M.; MATOS, A. T.; CECON, P.R; SILVA, D. D. Vermicompostagem de lodo de esgoto urbano e bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** [online]. 2002, v. 6, n. 3, pp. 487-491. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000300018>. Acesso em: 14 Ago. 2021

SILVA, L.N. **Processo de compostagem com diferentes porcentagens de resíduos sólidos agroindustriais**. Dissertação (mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel. 59f. 2007.

SOUZA, G. N; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. Desenvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinzas Residuais do Bagaço de Cana-de-açúcar. 2007. In: **49º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON**. Anais... Bento Gonçalves, Brasil: IBRACON. CD- ROM.

SPADOTTO, C.; RIBEIRO, W. **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. São Paulo: FEFAP, 2006.

TAIATELE JUNIOR, Ivan. **Biodegradabilidade de embalagens biodegradáveis e sua compostabilidade com resíduos orgânicos domiciliares**. 2014. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Coordenação de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2014.

TRAUTMANN, N.; OLYNCIW, E. Compost Microorganisms – The Phases of Composting. In: **Cornell Composting, Science & Engineering**. 2005. Disponível em: < <http://compost.css.cornell.edu/microorg.html> >. Acesso em 14 Ago. 2021.

TIQUIA, S.M; TAM, N.F.Y; HODGKISS, I.J. **Effects of turning frequency on composting of spent pig-manure sawdust litter**. *Bioresource Technol.*, 62: 37-42. 1997.

VALENTE, B. S.; XAVIER, E.G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D. S.; BRUM, B. de S. Jr.; CABRERA, B. R.; MORAES, P de O. e LOPES, D. C. N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de Zootecnia**. v.58. p.60-76, 2009.

WERTHER, J. *et al.* **Combustion of agricultural residues**. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 26, n. 1, p. 1–27, fev. 2000.

ZHANG, Y.; HE, Y. Co-compostig solid swine manure with pine sawdust as organic substrate. **Bioresource Technology**., v.97, p.2024-2031, 2006.