

**LÍVIA CRISTINA RIBEIRO**

**COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO: CARACTERIZAÇÃO E  
BIOESTABILIZAÇÃO**

**Botucatu**

**2018**



**LÍVIA CRISTINA RIBEIRO**

**COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO: CARACTERIZAÇÃO E  
BIOESTABILIZAÇÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Agricultura.

Orientador: Dirceu Maximino Fernandes  
Coorientadora: Caroline de Moura  
D'Andréa Mateus

**Botucatu**

**2018**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Ribeiro, Livia Cristina, 1986-  
R484c Compostagem de lodo de esgoto: caracterização e bioestabilização / Livia Cristina Ribeiro. - Botucatu: [s.n.], 2018  
93 p.: fots. color., grafs. color., ils. color., tabs.  
Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2018  
Orientador: Dirceu Maximino Fernandes  
Coorientador: Caroline de Moura D'Andréa Mateus  
Inclui bibliografia  
1. Adubação orgânica. 2. Matéria orgânica. 3. Resíduos orgânicos. I. Fernandes, Dirceu Maximino. II. Mateus, Caroline de Moura D'Andréa. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. IV. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO: CARACTERIZAÇÃO E BIOESTABILIZAÇÃO"

AUTORA: LÍVIA CRISTINA RIBEIRO  
ORIENTADOR: DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES  
Depto de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Prof. Dr. ROBERTO LYRA VILLAS BÔAS  
Depto de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

Profa. Dra. ROSEMARY MARQUES DE ALMEIDA BERTANI  
Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios / APTA - Regional Bauri

Botucatu, 06 de março de 2018.



Aos meus amados pais,  
Jader e Vera, e ao meu  
dedicado esposo Jayme,  
dedico





## AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora das Graças por todas as graças alcançadas ao longo da minha vida.

Aos meus queridos e amados pais Vera e Jader por todo o suporte emocional, amor incondicional e apoio constante.

Aos meus queridos irmãos Fernanda e Jader e ao meu cunhado José Augusto por estarem sempre presentes nos momentos difíceis, pela força e pelas risadas ao longo do caminho.

As minhas sobrinhas Ana Luiza, Ana Laura e ao meu sobrinho João Pedro por tornarem meus dias bem melhores e mais felizes e por me tornarem um ser humano melhor a cada dia.

Ao meu amado esposo Jayme, pelo carinho, paciência, ajuda, conforto e amor em todos os momentos das nossas vidas.

Aos meus sogros, Odiléia e Jayme por todo o suporte, carinho e atenção durante toda a minha vida acadêmica.

Ao Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes, pela orientação, ensinamentos, paciência, dedicação e amizade ao longo dos anos da graduação e do mestrado.

À Dra. Caroline de Moura D'Andréa Mateus, pela coorientação, apoio, dedicação, colaboração, paciência e amizade durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida.

À Cristiane de Pieri pela ajuda e ensinamentos referentes a quantificação e caracterização dos fungos.

À todos os funcionários do Departamento de Solos e Recursos Ambientais, por toda a ajuda e atenção despendidos durante a execução desse trabalho.

Aos técnicos e auxiliares de laboratório José Carlos Coelho, José Carlos de Pieri, Adriana Papa e Selma, por toda a ajuda, ensinamentos, paciência e carinho comigo durante a execução da parte laboratorial deste trabalho.

Às minhas grande amigas Silvia Capuani, Camila Pescatori Jacon, Tiara Guimarães, Aline Retz (Guandu), Débora Pantojo de Souza (Tieta), Jéssica Danila Silva (Samaúma), Giórgia Bonini, Raquel (Crisma) e Gleize Leviski, pelo ombro amigo, carinho, preocupação, ajuda nos momentos em que eu mais precisei, risos, companheirismo e conselhos, minha eterna gratidão.

Às minhas tias Daguemar Dezan, Guiomar Dezan e Eugênia Vizenotto Ignácio, obrigada por todo carinho, amor, colo, suporte emocional, e apoio que vocês me deram durante toda a minha vida, nossos laços não estão no DNA, mas na alma, e esses sim, são eternos.

À toda a equipe do “Team Lodo”, Marianne, Caio, Aline, Laura, Caroline, Marcelo, Mônica, Raquel, Rosemary, Roseli, Daniela, Camila, Professores Lyra, Iraê, Dirceu, Maura, e Magali, obrigada por me acolherem nesse grupo, por me ensinarem dia a dia, por toda a ajuda em todas as coletas e análises, sem vocês nada disso seria possível.

À todos que de forma direta ou indireta ajudaram durante a execução e conclusão desse trabalho, muito obrigada.

“<sup>1</sup>Para tudo há um tempo, para cada coisa há um momento debaixo dos céus...  
...<sup>9</sup>Que proveito tira o trabalhador de sua obra? <sup>10</sup>Vi o trabalho que Deus impôs aos  
homens, para que nele se ocupassem.<sup>11</sup>As coisas que Deus fez são boas a seu  
tempo. Ele pôs, além disso, no seu coração a duração inteira, sem que ninguém  
possa compreender a obra divina de um extremo a outro.<sup>12</sup>Assim, concluí que nada  
é melhor para o homem do que alegrar-se e procurar o bem-estar durante sua vida;  
<sup>13</sup>Igualmente é dom de Deus que todos possam comer, beber e gozar do fruto de  
seu trabalho.<sup>14</sup>Reconheci que tudo o que Deus faz dura para sempre, sem que se  
possa ajuntar nada, nem nada suprimir. Deus procede desta maneira para ser  
temido.<sup>15</sup>Aquilo que é, já existia, e aquilo que há de ser, já existiu; Deus chama de  
novo o que passou.”

**(Ecl,3:1, 9-15)**



## RESUMO

O uso do lodo de esgoto na agricultura é uma alternativa ambiental e economicamente viável para o resíduo. A compostagem propicia a eliminação de patógenos nocivos à saúde humana, viabilizando o uso do lodo de esgoto como fertilizante orgânico. Objetivou-se com o presente trabalho caracterizar o processo de compostagem de lodo de esgoto misturado com diferentes fontes de carbono (bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e casca de eucalipto) e analisar a bioestabilização dos compostos produzidos. A compostagem foi realizada em estufa durante 90 dias, em delineamento experimental em blocos ao acaso, com 4 repetições. A partir dos 40 dias de compostagem, foram realizadas coletas a cada 10 dias para avaliar as características químicas, físicas e biológicas dos compostos. As misturas de lodo de esgoto com bagaço de cana-de-açúcar e lodo de esgoto com casca de eucalipto proporcionaram a compostagem e a bioestabilização dos compostos no período de 90 dias, sendo verificado ao final do processo temperatura dos materiais próxima a temperatura ambiente, ausência de odor, presença de macronutrientes e micronutrientes disponíveis para as plantas, relação C/N abaixo de 20 e índices favoráveis no teste de germinação. A mistura de lodo de esgoto e casca de arroz não proporcionou a compostagem e o material não foi bioestabilizado no período de 90 dias.

**Palavras-chave:** adubação orgânica, matéria orgânica, resíduos orgânicos.



## ABSTRACT

The use of sewage sludge in agriculture is an environmentally and economically viable alternative. Composting can promote the elimination of pathogens harmful to human health, making possible the use of sewage sludge as an organic fertilizer. This study aimed at characterize the process of composting sewage sludge mixed with different carbon sources (sugarcane bagasse, rice husk and eucalyptus bark) and to analyze the biostabilization of the compounds produced. The composting was carried out in a greenhouse for 90 days in a randomized block design with four repetitions. From 40 days of composting, samples was collected every 10 days to evaluate the quimical, physical and biological characteristics of the compounds. The mixtures of sewage sludge with sugarcane bagasse and sewage sludge with eucalyptus bark provided the composting and biostabilization of the compounds in the period of 90 days. At the end of the process, the temperature of the materials was close to room temperature, absence of odor, presence of macronutrients and micronutrients available to the plants, C/N ratio below 20 and favorable rates in the germination test. The mixture of sewage sludge and rice husk did not provide composting and the material was not biostabilized within 90 days.

**Keywords:** organic matter, organic fertilization, organic residues.





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química dos materiais utilizados no processo de compostagem.....	30
Tabela 2 - Número de revolvimentos com a compostadora e aplicações de água (28 L/m <sup>3</sup> /aplicação) realizado em cada semana do processo de compostagem na Etapa 1.....	33
Tabela 3 - Valores de pH ao natural dos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem). ....	43
Tabela 4 - Condutividade elétrica (mS cm <sup>-1</sup> ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem). ....	45
Tabela 5 - Concentração de nitrogênio total (% base seca) nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).....	47
Tabela 6 - Concentração de N-NH <sub>4</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) nos três tratamentos(T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem) .....	48
Tabela 7 - Concentração de N-NO <sub>3</sub> (mg kg <sup>-1</sup> ) nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem). ....	49
Tabela 8 - Concentração de C orgânico (% base seca) nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).....	51
Tabela 9 - Relação C/N nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).....	52

Tabela 10 - Concentração de $P_2O_5$ (% base seca) nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem). .....	54
Tabela 11 - Concentração de $K_2O$ (% base seca) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).....	55
Tabela 12 - Concentrações de Ca (% base seca) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem). .....	56
Tabela 13 - Concentrações de Mg (% base seca) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).....	57
Tabela 14 - Concentrações de S (% base seca) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).....	58
Tabela 15 - Concentrações de Na ( $mg\ Kg^{-1}$ ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).....	59
Tabela 16 - Concentrações de B ( $mg\ Kg^{-1}$ ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).....	60
Tabela 17 - Concentrações de Cu ( $mg\ Kg^{-1}$ ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).....	61
Tabela 18 - Concentrações de Fe ( $mg\ Kg^{-1}$ ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e	

	T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem). .....	62
Tabela 19 -	Concentrações de Mn ( $\text{mg Kg}^{-1}$ ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem). .....	62
Tabela 20 -	Concentrações de Zn ( $\text{mg Kg}^{-1}$ ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem). .....	63
Tabela 21 -	Metais pesados ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em duas épocas de coleta (40 e 90 dias de compostagem). .....	64
Tabela 22 -	Concentrações máximas de metais pesados permitida pelas Resoluções nos 375/2006 e 380/2006 (CONAMA).....	65
Tabela 23 -	Porcentagem média da amostra passante no jogo de peneiras com malhas de 4 mm, 3,35 mm, 1 mm, e 0,3 mm para amostras dos 3 compostos aos 40 e aos 90 dias de compostagem (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto).....	66
Tabela 24 -	Especificação granulométrica estabelecida para fertilizantes orgânicos e biofertilizantes pela IN no 25/2009 (MAPA).....	67
Tabela 25 -	Unidades formadoras de colônias (UFCs em 5 gramas de composto) fúngicas nos 3 compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).....	71



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Disposição das leiras de compostagem na estufa de compostagem.....31
- Figura 2 - A: Retroescavadeira e caminhão basculante utilizados na montagem das leiras de compostagem. B: Auxílio dos alunos envolvidos no projeto para manter o formato das leiras utilizando tábuas de contenção. C: Máquina compostadora.....32
- Figura 3 - Aferição da temperatura das pilhas de compostagem com termômetro portátil digital da marca SALVTERM 1200K.....34
- Figura 4 - Pontos de coleta de amostra para análise de umidade. ....34
- Figura 5 - Diluição seriada das amostras para caracterização e quantificação dos fungos presentes nos compostos estudados .....39
- Figura 6 - Temperatura e Umidade dos 3 compostos a partir do primeiro dia de compostagem, sendo T1 = bagaço de cana de açúcar+lodo de esgoto, T2 = casca de arroz+lodo de esgoto e T3 = casca de eucalipto+lodo de esgoto.....41
- Figura 7 - Teste de germinação de rúcula (A), nabo forrageiro (B), milho (C) e crotalaria (D) nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem) .....70
- Figura 8 - Porcentagem de cada gênero de fungo encontrado em cada tratamento. ....72
- Figura 9 - Quadro de identificação dos fungos encontrados nos 3 compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).....73
- Figura 10 - Fotos dos fungos encontrados nos compostos: à esquerda foto tirada do microscópio e à direita foto tirada da colônia fúngica. A = *Trichoderma* sp.; B = *Aspergillus* sp.; C = *Mucor* sp.; D = *Penicillium* sp.; E = *Rhizopus* sp.; F = *Blastomyces* sp.; G = *Cladosporium* sp.; H = *Verticillium* sp.; I = *Gliocladium* sp.....75



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	25
2.1	Lodo de esgoto .....	25
2.2	Compostagem .....	26
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	30
3.1	Caracterização da área experimental.....	30
3.2	Delineamento experimental e tratamentos .....	30
3.3	Execução do experimento .....	31
3.4	Análises realizadas nas leiras de compostagem .....	33
3.4.1	Temperatura.....	33
3.4.2	Umidade .....	34
3.5	Análises laboratoriais .....	35
3.5.1	pH.....	35
3.5.2	Condutividade Elétrica.....	36
3.5.3	N total, N amoniacal e N nítrico.....	36
3.5.4	Análise química .....	36
3.5.5	Metais pesados .....	36
3.5.6	Granulometria.....	37
3.5.7	Teste de germinação.....	37
3.5.8	Caracterização e quantificação de fungos.....	38
3.6	Análise estatística.....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	41
4.1	Resultados obtidos nas leiras de compostagem .....	41
4.1.1	Temperatura.....	41
4.1.2	Umidade .....	42
4.2	Resultados obtidos nas análises laboratoriais.....	43
4.2.1	pH.....	43
4.2.2	Condutividade elétrica (C.E.).....	45
4.2.3	N total, N amoniacal e N nítrico.....	46
4.2.4	Carbono orgânico (C).....	50
4.2.5	Relação C/N .....	52
4.2.6	Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) .....	53

4.2.7	Potássio (K <sub>2</sub> O)	55
4.2.8	Cálcio (Ca)	55
4.2.9	Magnésio (Mg)	57
4.2.10	Enxofre (S)	58
4.2.11	Sódio (Na)	59
4.2.12	Boro (B)	59
4.2.13	Cobre (Cu)	60
4.2.14	Ferro (Fe)	61
4.2.15	Manganês (Mn)	62
4.2.16	Zinco (Zn)	63
4.2.17	Metais pesados	64
4.2.18	Granulometria	66
4.2.19	Teste de germinação	67
4.2.20	Caracterização e quantificação de fungos	70
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>76</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE A</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE B</b>	<b>89</b>
	<b>APÊNDICE C</b>	<b>91</b>
	<b>APÊNDICE D</b>	<b>93</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto é um resíduo sólido orgânico oriundo do tratamento do esgoto sanitário realizado nas estações de tratamento de esgoto (ETE). Por ser um material rico em matéria orgânica é utilizado na agricultura como fertilizante orgânico composto, regulamentado pelo Decreto nº 4.954/2004 e limitado pelas Resoluções no 375/2006, 380/06 e 481/2017 (CONAMA) e pelas IN nos 27/2006 e 25/2009 (MAPA).

A legislação vigente sobre o uso do lodo de esgoto na agricultura determina níveis máximos de concentração de patógenos e metais pesados, agentes considerados tóxicos ao homem, animais, solo e lençol freático, para evitar contaminação e poluição do ambiente.

A compostagem é um processo de decomposição de materiais orgânicos que resulta em material de composição similar ao húmus do solo através da ação de microorganismos (MONTEIRO et al., 2001). É uma alternativa de viabilizar o uso do lodo de esgoto, pois, através dessa técnica, pode-se eliminar e/ou diminuir os patógenos, atendendo os níveis máximos exigidos pela legislação para uso do material, devido ao aumento da temperatura acima de 55°C.

O tempo necessário para conclusão do processo de compostagem e obtenção de um produto quimicamente estável, uniforme, inodoro e nutricionalmente viável para fins agrícolas varia de acordo com os materiais empregados no processo e com o tipo de processo a ser realizado.

O material resultante da compostagem é chamado composto e, ao longo do processo de compostagem, é estabilizado quimicamente, gerando material rico em nutrientes prontamente disponíveis para as plantas. É considerado pronto quando apresenta temperatura constante, cor escura, textura uniforme, cheiro parecido ao de solo úmido ou inodoro, macro e micronutrientes em faixas disponíveis para as plantas, boa porosidade e capacidade de retenção de água, entre outros fatores (MONTEIRO et al., 2001; PEDROSA et al., 2013).

A qualidade do composto depende diretamente dos materiais utilizados na compostagem, pois são eles que determinarão a quantidade de macro e micronutrientes presentes no composto final, a capacidade de retenção de água e sua porosidade.

A caracterização e bioestabilização dos compostos, principalmente os de lodo de esgoto, se faz necessária para viabilizar o uso na agricultura, seja como substituto ou complemento de adubos inorgânicos, como substrato para a produção de mudas ou como condicionador de solos.

Assim, o presente trabalho possui as seguintes hipóteses: 1 – a compostagem dos diferentes materiais + lodo de esgoto terminará em menos de 90 dias, quando as leiras de compostagem atingirem temperaturas próximas às temperaturas do ambiente; 2 – o composto de lodo de esgoto + bagaço de cana-de-açúcar será compostado em menor tempo, devido ao menor tamanho e maior uniformidade entre as partículas do material; 3 – os tratamentos formarão compostos que poderão ser utilizados como fertilizante orgânico, condicionador de solo ou substrato na agricultura, de acordo com os critérios impostos pela legislação vigente; 4 – o uso dos compostos não prejudicará a germinação de sementes de culturas agrícolas; 5 – a elevação da temperatura durante a compostagem será suficiente para eliminar e/ou diminuir patógenos nocivos à saúde humana nos três compostos produzidos.

Objetivou-se com o presente trabalho caracterizar o processo de compostagem de lodo de esgoto misturado com diferentes fontes de carbono (bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e casca de eucalipto) e analisar a bioestabilização dos compostos produzidos.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Lodo de esgoto

O lodo de esgoto é o resíduo sólido proveniente do tratamento do esgoto sanitário.

Com o aumento populacional e conseqüentemente do número das estações de tratamento de esgoto no país houve acréscimo na produção de lodo de esgoto, o que gerou um problema sanitário a respeito de onde e como descartar esse produto.

De acordo com Wagner et al. (2009) são muitas as alternativas para o tratamento do esgoto e destinação final do lodo de esgoto. O tratamento biológico via digestão anaeróbica ou aeróbica seguido ou não pela destinação em aterros sanitários, "landfarming" (método de biorremediação que consiste na aplicação de resíduos na superfície do solo para a degradação microbiana), lagoas de armazenagem, incineração, disposição em oceanos, recuperação de terrenos da mineração e reciclagem agrícola são os mais comuns. Existem ainda algumas formas alternativas para descartar esse material como agregados para construção civil, fabricação de tijolos e cerâmicas, fonte de energia e transformação em combustível (HARRIS-PIECE et al., 1995; TSUTIYA, 2001; SANTOS et al., 2017).

Atualmente a reciclagem agrícola é a destinação de maior interesse, uma vez que o material apresenta composição rica em macro e micronutrientes, sendo um excelente fertilizante orgânico (CONTIN et al., 2012). Porém, para que isso ocorra, o lodo gerado deve atender a algumas exigências impostas pelas leis vigentes que regulamentam o uso do lodo de esgoto na agricultura.

Essas leis são o Decreto nº 4.954/2004, as Instruções Normativas nºs 27/2006 e 25/2009 (MAPA), as Resoluções nºs 375/2006, 380/2006 e 481/2017 (CONAMA). Toda essa legislação vigente possibilita o uso do lodo de esgoto na agricultura como fertilizante orgânico, condicionador de solo ou substrato, desde que respeite as concentrações máximas de metais pesados, patógenos nocivos à saúde humana, animal e vegetal, e também não seja vetor de pragas e não contenha sementes de plantas daninhas.

O lodo de esgoto pode ser usado como fertilizante orgânico por ser fonte de nutrientes e ter mostrado aumento na produtividade de diversas culturas de interesse agrônômico (SILVA et al., 2010). Outro grande benefício trazido pelo uso do lodo de esgoto na agricultura é a melhoria da fertilidade do solo, pois, quando

incorporado ao solo aumenta a CTC, reduz as concentrações de alumínio trocável e é fonte de macro e micronutrientes para as culturas (PRADO e CUNHA, 2011).

Além disso, pode agir como condicionador de solo, pois devido a sua constituição orgânica melhora o estado de agregação das partículas do solo e conseqüentemente ocorre maior aeração e capacidade de retenção de água. Além disso, o lodo de esgoto pode aumentar a atividade microbiana do solo, trazendo, portanto, melhorias significativas nos atributos físicos e biológicos dos solos (WILSON et al., 1996; GALDOS et al., 2004; PRADO e CUNHA, 2011).

O lodo de esgoto pode ser usado como substrato para produção de mudas florestais, o que pode aumentar a capacidade de retenção de água, fornecimento de macro e micronutrientes às mudas, gerando economia na adubação, sendo uma alternativa menos onerosa que os substratos comerciais. Além disso, há os benefícios ambientais proporcionados pela reutilização de materiais que seriam descartados no ambiente (SILVA et al., 2015).

## 2.2 Compostagem

A compostagem é um processo biológico que visa tratar e estabilizar resíduos orgânicos com o intuito de produzir composto orgânico. Durante a compostagem, a matéria orgânica é decomposta pela ação de microorganismos e enzimas, levando a fragmentação e oxidação gradual de detritos (BUDZIAK et al., 2004). Para que ocorra a compostagem é necessário que haja microorganismos e qualquer fator que afete a atividade microbiológica afeta o processo de compostagem, sendo eles: aeração, temperatura, teor de umidade, teor de nutrientes e relação C/N (NOGUEIRA et al., 2007; VERAS e POVINELLI, 2004).

Os processos de compostagem ocorrem em duas fases distintas: estabilização e maturação. Primeiramente, microorganismos mesófilos se instalam e provocam a elevação da temperatura. Quando esta atinge entre 40°C e 45°C, ocorre diminuição da população mesofílica e aumento dos microorganismos termófilos, o que provoca elevação da temperatura até 70°C, levando a uma intensa degradação da matéria orgânica. Quando a temperatura abaixa e atinge valores próximos a temperatura ambiente, está concluída a fase de estabilização (FERNANDES et al.; 1993; SILVA, 2007).

Quando acaba a estabilização ou bioestabilização do material compostado, se inicia a maturação, que é um estágio longo, onde ocorre a humificação do material,

acompanhada da mineralização de componentes da matéria orgânica, como N, P, Ca e Mg, que passam da forma orgânica para a inorgânica (RODRIGUES et al., 2016b; KIEHL, 1985). Além disso, o processo de compostagem pode reduzir a disponibilidade de metais pesados, pois a mineralização de compostos orgânicos durante o processo controlam a disponibilidade de metais e cátions para as plantas (VACA et al., 2011).

A compostagem dos resíduos sólidos pode minimizar a poluição ambiental, pois evita a deposição dos mesmos em aterros e rios, além de promover a eliminação ou redução de patógenos e melhorar a estrutura do solo devido ao acréscimo de matéria orgânica (LONGHURST et al., 2010; RODRIGUES et al., 2016b). Ao fim do processo de compostagem, a matéria orgânica se torna um produto mais seco, uniforme e biologicamente estável, podendo ser usado como boa fonte de nutrientes para as plantas (VACA et al., 2011).

A compostagem se destaca como meio economicamente e ambientalmente viável para o tratamento de resíduos sólidos orgânicos e industriais para uso agrícola. Entretanto, o processo de compostagem provoca alterações nas características físicas e químicas do material orgânico reduzindo sua massa e volume (ORRICO Jr. et al., 2009; TEXEIRA et al., 2016).

A qualidade do produto compostado indicará seu uso mais apropriado, entretanto, de acordo com Pereira Neto e Lelis (1999), o produto mesmo não tendo qualidade boa, não produzirá gases, chorume e propiciará o crescimento de vegetais em áreas contaminadas e solos estéreis, voçorocas e aterros.

Corrêa et al. (2007) estudaram a viabilidade da compostagem de podas de árvores, cavacos de madeira, grama e de serragem com lodo de esgoto produzido na ETE do Distrito Federal. Para montagem das 6 leiras de compostagem foram usadas proporções diferentes dos materiais estruturantes e lodo de esgoto variando entre 3 e 4:1, e foi calculada a relação C/N que se manteve entre 21 e 36 em todas as leiras. Os autores relataram que após a compostagem em leiras de aeração passiva todos os materiais estudados bioestabilizaram de forma eficiente em aproximadamente 2 meses e atingiram a temperatura necessária para a higienização do material (55°C), no entanto, a leira que tinha 50% a mais de serragem apresentou redução no tempo de compostagem, atingindo a bioestabilização em um mês.

Um dos índices utilizados para observar a bioestabilização no processo de compostagem é o teste de germinação.

De acordo com a regra de análise de sementes (BRASIL, 2009), o teste de germinação é usado para comparar a qualidade de lotes de sementes e estimar a semeadura em campo, a germinação de sementes em teste de laboratório é a emergência e desenvolvimento das estruturas essenciais do embrião, sendo assim um método de análise da qualidade de lotes de sementes.

Entretanto, o teste de germinação de sementes vem sendo utilizado por diversos autores como um índice para a avaliação da maturidade e um indicador sensível a fitotoxicidade causada por substâncias de baixo peso molecular e ácidos orgânicos produzidos durante a decomposição microbiana nos processos de compostagem (ZUCCONI et al., 1981; BERNAL et al., 2009; YANEZ et al., 2009; GUO et al., 2012; AWASKI et al., 2014).

De acordo com Bernal et al. (2009) pode-se usar testes de germinação, de crescimento, uma combinação entre testes de germinação e de crescimento e testes de atividade enzimática para se avaliar a qualidade de compostos. Segundo Zucconi e Bertoldi (1987), a diferença entre testes de germinação e de crescimento é que o primeiro fornece uma ideia instantânea da fitotoxicidade dos compostos enquanto o segundo é afetado por mudanças contínuas da fitotoxicidade e maturação dos compostos, podendo haver efeitos negativos no início da compostagem e positivos mais ao final do processo.

Zucconi et al. (1981) relataram que índices de germinação abaixo de 50% são características de compostos imaturos, entretanto Awaski et al. (2014) relataram que índices de germinação superiores a 80% foram usados para indicar o desaparecimento da fitotoxicidade e a maturação de compostos, por outro lado García Gómez et al. (2001) relataram efeitos de fitotoxicidade em virtude do uso de compostos em cultivo de azevém, mesmo com índices de germinação superiores a 87%.

De acordo com Guo et al. (2012) maturidade e estabilidade são usadas como qualidade de compostos, a maturidade se refere a degradação de substâncias fitotóxicas e geralmente é medida pelo índice de germinação e a estabilidade se refere à atividade microbiana e é medida pelo índice de respiração. A aplicação de compostos que ainda não estão maduros e bioestabilizados aos solos pode restringir

o crescimento de plantas e liberar substâncias tóxicas no meio (BERNAL et al., 2009).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área experimental

A compostagem foi realizada na estação de tratamento de esgoto (ETE) de Botucatu, pertencente a SABESP, localizada na Fazenda Experimental Lageado da FCA/UNESP, onde foi construída uma estufa.

A estufa de compostagem foi construída com 12,8 m de largura, 80 m de comprimento e 6,5 m de altura, a cobertura é de filme polietileno com espessura de 150 micras e tratamento contra raios ultravioleta, as laterais tem fechamento fixo, um lado com o mesmo material da cobertura e o outro com tela branca de malha 30% e tratamento contra raios ultravioleta.

#### 3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O lodo utilizado no experimento foi o lodo digerido de reatores anaeróbicos de fluxo ascendente(UASB), proveniente da ETE de Botucatu. Foram utilizadas três fontes diferentes de carbono para a compostagem: bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e casca de eucalipto, cuja análise química antes da compostagem encontra-se na Tabela 1. Dessa forma, os tratamentos foram assim estabelecidos: T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto; T2: casca de arroz + lodo de esgoto; T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto, na proporção volumétrica de 3:1, sendo três partes das fontes de carbono para uma parte de lodo de esgoto.

Tabela 1 - Caracterização química dos materiais utilizados no processo de compostagem.

Material	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	S	Um	C-Total
	----- ** porcentagem ao natural -----							
Casca de arroz	0,5	ND	0,2	0,2	ND	0,3	8	39
Bagaço de cana	0,2	0,1	0,1	0,1	ND	0,1	39	30
Casca de eucalipto	0,3	ND	0,1	0,4	0,1	0,1	55	22
Lodo de esgoto	0,8	0,7	ND	0,2	ND	0,5	80	6
Material	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	C/N	pH
	----- **mg kg <sup>-1</sup> ao natural-----						ao natural	
Casca de arroz	239	17	35	155	383	4	78/1	5,5
Bagaço de cana	183	44	12	567	17	2	150/1	4,4
Casca de eucalipto	116	73	4	824	107	17	73/1	4,7
Lodo de esgoto	82	36	27	60	58	108	8/1	6,8

\*\*Teores totais. ND = não detectado < 0,1% ou < mg kg<sup>-1</sup>.

O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso com 4 repetições. Na estufa de compostagem foram montadas 2 leiras de compostagem de cada tratamento com dimensões de 16 m de comprimento, 3 m de largura e 1,5 m

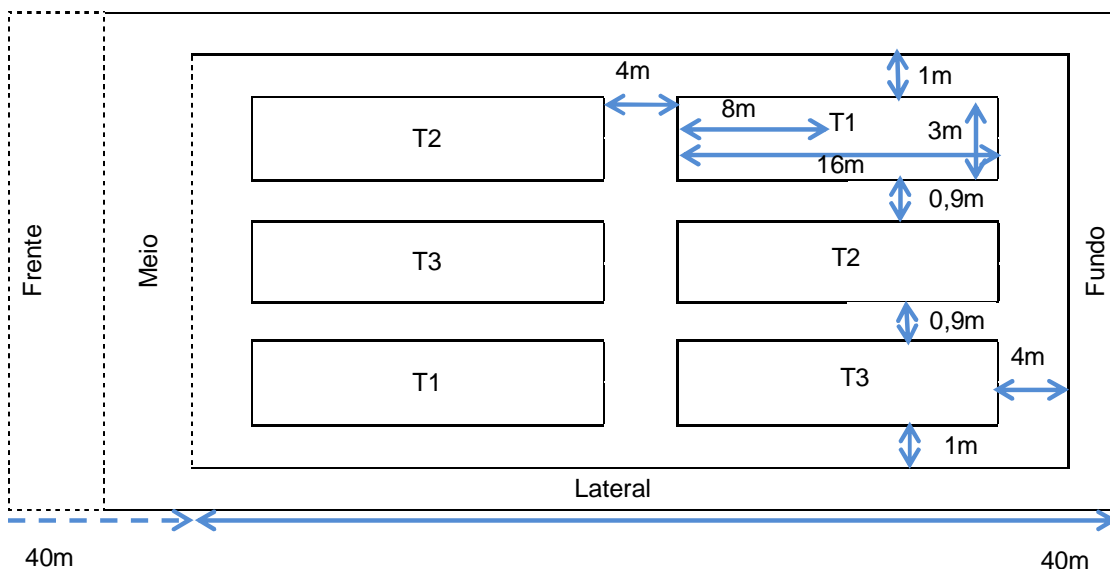


de altura, totalizando  $72 \text{ m}^3$  por tratamento. Cada leira dos tratamentos representou duas parcelas de 8 m lineares ( $18 \text{ m}^3$ ), totalizando 3 tratamentos com 4 repetições.

### 3.3 Execução do experimento

As leiras de compostagem foram montadas nos dias 19, 20 e 21 de julho de 2016 e foram dispostas na estufa conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Disposição das leiras de compostagem na estufa de compostagem.



Para esse experimento foi utilizado metade do comprimento da estufa para a montagem das leiras de compostagem, ou seja, dos 80 m de comprimento foram utilizados 40 m. A altura da mistura das fontes de carbono e lodo de esgoto após a montagem das leiras foi de 1,5 m.

Para a montagem das leiras foram utilizados retroescavadeira e caminhão basculante (Figura 2A), de forma que foi utilizado como medida volumétrica a caçamba do carregador frontal da retroescavadeira. Para determinar a quantidade da fonte de carbono e de lodo de esgoto em cada tratamento foi usado como critério inicial a relação C/N com o objetivo de formar uma mistura com relação C/N entre 25 e 30. Dessa forma, determinou-se que a mistura teria 3 partes da fonte de carbono para uma parte de lodo de esgoto, ou seja, três caçambas do carregador frontal da retroescavadeira da fonte de carbono para uma de lodo de esgoto.

Na montagem das leiras os materiais eram colocados no caminhão basculante com a retroescavadeira, sendo levados para a estufa e descarregados em formato

de leiras. Para isso, foi utilizado tábuas de contenção (Figura 2B) para manter o formato de leiras, possibilitar o revolvimento com a máquina compostadora (Figura 2C) e evitar o contato entre as leiras de fontes de carbono diferentes.

A frequência de revolvimento das leiras variou ao longo do processo, de acordo com as características físicas (temperatura e umidade) apresentadas pelo material. Procurou-se revolver as leiras sempre que os materiais passavam de 65°C. No início do processo o revolvimento foi utilizado também para homogeneizar o material, sendo realizados até 3 revolvimentos na primeira semana, em dias intercalados. Durante o processo de compostagem foram realizados 17 revolvimentos (Tabela 2).

Figura 2 - A: Retroescavadeira e caminhão basculante utilizados na montagem das leiras de compostagem. B: Auxílio dos alunos envolvidos no projeto para manter o formato das leiras utilizando tábuas de contenção. C: Máquina compostadora.



A partir dos 45 dias de compostagem foi adicionado água no sistema com o intuito de continuar o processo de compostagem que diminuiu devido a baixa umidade. Foram realizadas 10 aplicações de 28 L m<sup>-3</sup> para cada leira dos 45 até os 80 dias de compostagem (Tabela 2). As aplicações foram realizadas através do uso de um hidrômetro conectado à fitas de gotejamento que ficaram dispostas sobre as leiras a fim de se fazer uma irrigação mais uniforme e medir a vazão da água.

Dependendo da umidade em que o composto estava e da temperatura das leiras de compostagem a irrigação era realizada de 1 a 3 vezes por semana (Tabela 2). Após cada irrigação o material era revolvido com a máquina compostadora.

Tabela 2 - Número de revolvimentos com a compostadora e aplicações de água (28 L/m<sup>3</sup>/aplicação) realizado em cada semana do processo de compostagem na Etapa 1.

<b>Semana do processo de compostagem</b>	<b>Número de revolvimentos com a compostadora</b>	<b>Número de aplicações de água (28 L/m<sup>3</sup>/aplicação)</b>
1	3	0
2	2	0
3	2	0
4	2	0
5	1	0
6	0	0
7	1	2
8	2	2
9	0	1
10	1	1
11	2	3
12	1	1
13	0	0
<b>Total no período</b>	<b>17 revolvimentos</b>	<b>10 aplicações (280 L/m<sup>3</sup>)</b>

### 3.4 Análises realizadas nas leiras de compostagem

#### 3.4.1 Temperatura

A temperatura foi aferida diariamente com auxílio de termômetro portátil digital da marca SALVTERM 1200K com haste de 1m. A avaliação foi realizada diariamente, até o final da compostagem, sempre no mesmo horário (10h30min), ao longo do perfil da leira.

A haste do termômetro era colocada inicialmente perpendicularmente a altura média da leira (Figura 3) em 4 pontos diferentes de cada parcela experimental. Ao longo do processo de compostagem, as leiras foram perdendo altura, partindo de 1,5 m para 0,30 m, então as aferições eram realizadas com o intuito de se inserir toda a haste do termômetro na leira obtendo-se as temperaturas mais próximas do centro, dessa forma a haste foi ficando inclinada de forma longitudinal a leira ao final do processo de compostagem. Os pontos de aferição da temperatura podem ser observados na Figura 3, uma vez que são os mesmos pontos de coleta das amostras para análise de umidade. Para verificar a temperatura ambiente foi instalado um termômetro de máxima, mínima e média na estufa, na mesma altura das leiras de compostagem.

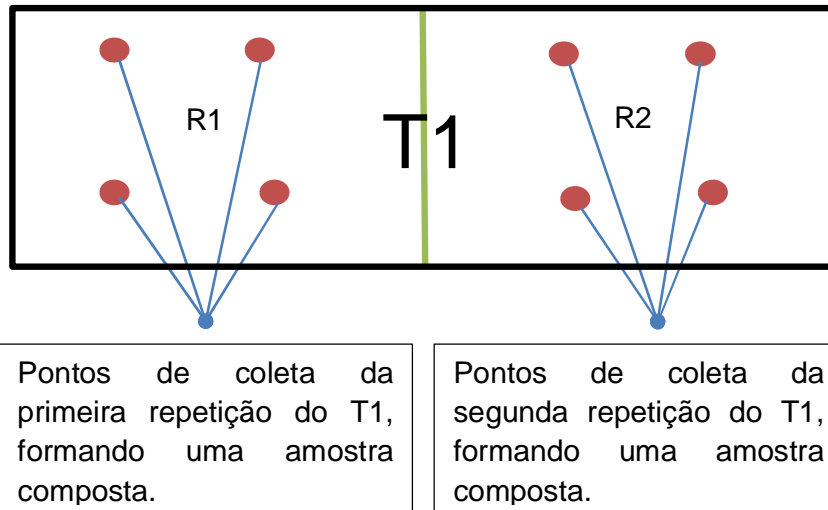
Figura 3 - Aferição da temperatura das pilhas de compostagem com termômetro portátil digital da marca SALVTERM1200K.



### 3.4.2 Umidade

Duas vezes por semana uma pequena amostra da mistura do lodo de esgoto com a fonte de carbono utilizada em cada tratamento era coletada de cada repetição para que se realizasse o monitoramento da umidade da compostagem. As amostras eram coletadas com auxílio de trado tipo caneca em quatro pontos de cada repetição da pilha de compostagem, formando uma amostra composta, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Pontos de coleta de amostra para análise de umidade.



O trado tipo caneca era inserido a uma profundidade de aproximadamente 80 cm na leira de compostagem de forma perpendicular à lateral da mesma (na altura média da leira), assim a amostra representava todo o perfil da leira de compostagem.

Após a coleta, as amostras compostas eram armazenadas em sacos plásticos e imediatamente encaminhadas para o Departamento de Solos e Recursos Ambientais, onde eram pesadas e colocadas para secar em estufa com temperatura de 65°C até atingirem peso constante, quando eram pesadas novamente, seguindo metodologia proposta por Brasil/MAPA(2014).

### 3.5 Análises laboratoriais

A partir dos 40 dias de compostagem, no dia 02 de setembro de 2016, quando as temperaturas da compostagem começaram a ficar estáveis e próximas da temperatura ambiente para a maioria dos tratamentos, se iniciou as coletas para as análises laboratoriais dos compostos, com o objetivo de identificar o final do processo e a bioestabilização. Para isso, foram realizadas a cada 10 dias, até os 90 dias de compostagem, seguindo o mesmo procedimento utilizado com as amostras para determinar a umidade.

Após a coleta, as amostras eram acondicionadas em sacos plásticos e levadas para o Departamento de Solos e Recursos Ambientais (FCA/UNESP), onde eram separadas em subamostras para realização das análises de umidade, pH, condutividade elétrica, granulometria, N-total, N-amoniaco e N-nítrico, química ( $P_2O_5$ ,  $K_2O$ , Ca, Mg, S, C total, Na, B, Cu, Fe, Mn, Zn, relação C/N), metais pesados (As, Ba, Cd, Pb, Cu, Co, Cr, Hg, Mo, Ni, Se, Zn), teste de germinação e quantificação e caracterização dos fungos presentes nos materiais compostados.

Todos os resultados foram corrigidos para base seca para possibilitar a comparação entre tratamentos e datas de coleta.

#### 3.5.1 pH

Para análise de pH foi separada uma amostra de 10 g dos tratamentos frescos imediatamente após a coleta. Depois de pesadas, as amostras recebiam 50 mL de solução de  $CaCl_2$  (0,01 molar), sendo em seguida misturadas com auxílio de bastão de vidro. Após repouso de 15 minutos, realizava-se a leitura na solução sem filtragem com um pH-metro Micronal, modelo B474, previamente calibrado. A metodologia empregada foi de Brasil/MAPA (2014).

### 3.5.2 Condutividade Elétrica

Para análise da condutividade elétrica foi separada uma amostra de 10 g dos tratamentos frescos, imediatamente após a coleta. Depois de pesadas, as amostras recebiam 50 mL de água deionizada, sendo em seguida misturadas com auxílio de bastão de vidro. Após repouso de 15 minutos, as amostras eram filtradas em filtro rápido e a leitura realizada com condutivímetro Digimed, modelo DM-3P previamente calibrado em  $\text{dS cm}^{-1}$ .

Após a leitura, os valores de condutividade elétrica de cada amostra foram corrigidos com a finalidade de se padronizar a umidade de todas as amostras em 30% para possibilitar a comparação entre tratamentos e datas de coleta. Para realizar tal correção, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$CE = \frac{\text{Leitura da condutividade} - 70}{100 - \text{Umidade}} \quad (1)$$

### 3.5.3 N total, N amoniacal e N nítrico

Para realizar as análises de N-amoniacal e de N-nítrico foi utilizada a metodologia estabelecida por Malavolta et.al. (1997).

Para N-total foi utilizada metodologia estabelecida por Brasil/MAPA (2014) para fertilizantes orgânicos.

### 3.5.4 Análise química

Para análise dos teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , Ca, Mg, S, Na, B, Cu, Fe, Mn e Zn foi utilizada metodologia estabelecida por Brasil/MAPA (2014) para fertilizantes orgânicos.

Para análises do teor de carbono total e determinação da relação C/N foi utilizada metodologia para fertilizantes orgânicos estabelecida por Lanarv (1988).

### 3.5.5 Metais pesados

Para análise de metais pesados foi utilizado o método EPA-SW-846-3051, com determinação por espectroscopia de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado ICP-AES (USEPA, 2017).

Foram estabelecidos os teores de As, Ba, Cd, Pb, Cu, Co, Cr, Hg, Mo, Ni, Se e Zn.

### 3.5.6 Granulometria

Para análise granulométrica foram utilizadas amostras de aproximadamente 200g. Após a pesagem, essas amostras eram encaminhadas para estufa à temperatura constante de 65°C, onde permaneciam até atingirem peso constante.

Após a secagem das amostras, essas eram colocadas em um agitador com jogo de peneiras com malhas de 4 mm, 3,35 mm, 1 mm, 0,3 mm e o fundo. Cada amostra era agitada por 5 minutos em agitador elétrico de bancada. Depois da agitação a parcela retida em cada peneira e no fundo era pesada novamente, para calcular a fração neles retida. Em seguida, foi calculado o percentual do material passante em cada peneira, de acordo com Brasil/MAPA (2014).

### 3.5.7 Teste de germinação

Foram realizados testes de germinação com 4 culturas diferentes, sendo crotalária-spectabilis (*Crotalaria spectabilis*), nabo-forrageiro (*Raphanus sativus*), milho (*Pennisetum glaucum*) e rúcula (*Eruca sativa*), com o intuito de avaliar a bioestabilização dos diferentes compostos de lodo de esgoto.

Segundo a regra de análise de sementes (BRASIL, 2009) a rúcula é uma cultura hortícola, usada para testes de qualidade de substratos, o teste de germinação deve ser feito com temperatura variando de 20 a 25°C e as avaliações devem ser realizadas aos 4 e aos 7 dias. O nabo forrageiro pode ser considerado uma cultura forrageira, hortícola, invasora e medicinal, o teste de germinação deve ser realizado entre 20 e 30°C e as avaliações devem ser feitas aos 4 e aos 10 dias. O milho é uma cultura forrageira cujo teste de germinação deve ser feito entre 20 e 35°C e as avaliações realizadas aos 3 e aos 10 dias. A crotalária também é uma cultura forrageira cujo testes de de germinação deve ser realizado com temperatura variando entre 20 e 30°C e avaliado aos 4 e aos 10 dias.

A escolha das culturas para o teste de germinação foi feita com o intuito de se ter culturas de diferentes famílias com diferentes usos agrícolas, entretanto os testes deveriam ser realizados em temperaturas e intervalos de tempo semelhantes, dessa forma escolheu-se duas plantas da família Brassicaceae, sendo uma hortícola (rúcula) e uma forrageira (nabo forrageiro), uma planta da família Poaceae ou Graminae (milho) usada como forrageira e pastagem e uma planta da família Leguminoseae (crotalária) usada como forrageira e adubo verde.

Os testes de germinação foram realizados em placas de Petri com volume de 60,32 cm<sup>3</sup>. A partir do volume da placa e da densidade de cada tratamento, foi calculada a massa da amostra de cada tratamento utilizado para o teste de germinação.

Para o tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, a massa calculada foi de 8,44 g, para casca de arroz + lodo de esgoto foi de 10,86 g e para casca de eucalipto e lodo de esgoto foi de 10,25 g.

A partir da massa do composto e do teor de água no momento da coleta, foi realizado cálculo para se elevar a umidade a 100% com água deionizada. Foi realizado também, cálculo para saber a massa que as placas de Petri teriam quando a umidade do composto atingisse 60%. A partir daí, as placas de Petri eram pesadas diariamente e quando sua massa era inferior a massa que representava a umidade de 60%, a água era repostada com auxílio de pipeta até a conclusão do teste de germinação.

Foi realizado paralelamente um teste de germinação como testemunha seguindo as normas das Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009), para verificar o padrão de germinação das sementes utilizadas.

Foram colocadas 25 sementes por placa de Petri sendo utilizadas duas placas por cultura. Dessa forma, foram utilizadas 50 sementes de cada cultura por tratamento (tipo de composto). Todas as placas de Petri foram colocadas em BOD com fotoperíodo de 12 horas e temperatura entre 20 – 30°C.

As avaliações foram realizadas aos 4 e aos 10 dias para crotalária e nabo-forrageiro, aos 3 e aos 7 dias para milho e aos 4 e aos 7 dias para rúcula, seguindo a recomendação da Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

Em cada avaliação foi contado o número de sementes germinadas e ao fim da segunda avaliação foi verificada a porcentagem de sementes germinadas em cada tratamento para comparação com o teste de germinação testemunha.

### 3.5.8 Caracterização e quantificação de fungos

Para realização da caracterização e quantificação dos fungos presentes nos compostos foi realizada uma diluição seriada das amostras em solução salina a 8%.

Para tanto foi pesado 5 g de cada amostra, essas 5 g foram diluídas em 45 ml de uma solução salina a 8%, posteriormente foi retirada uma alíquota de 5 ml desse material diluído, e então esses 5 ml foram diluídos novamente em 45 ml da solução



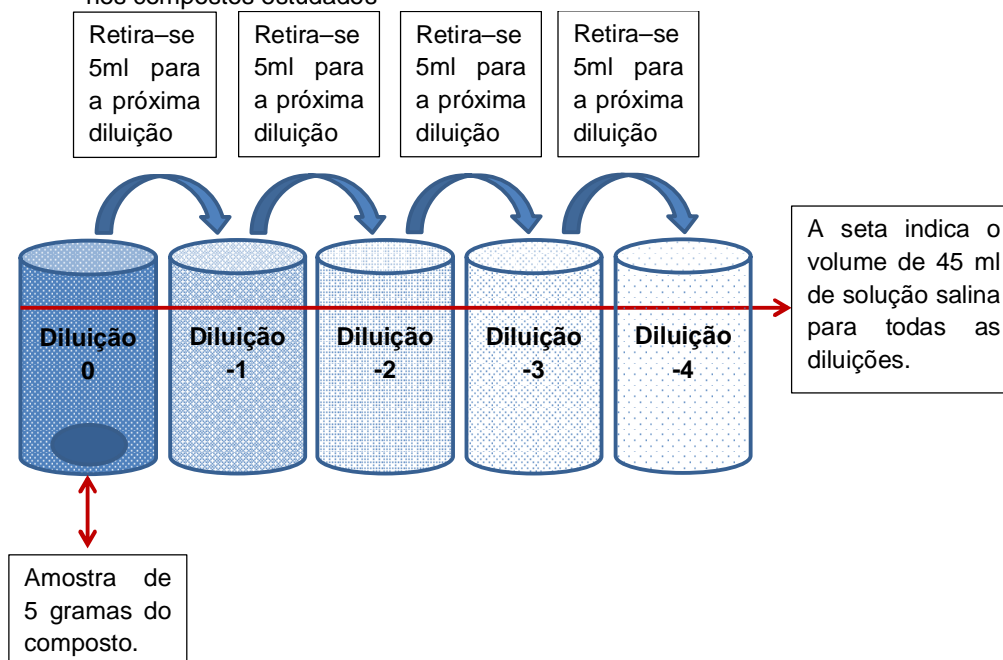
salina. Esse processo de diluição foi repetido por 4 vezes, formando assim 4 níveis de diluição (-1, -2, -3 e -4). A Figura 5 ilustra o processo de diluição seriada.

Depois da diluição seriada, foi retirada uma alíquota de 1 ml de cada diluição de cada amostra e, posteriormente, foi colocada em placa de Petri, onde foi adicionado meio de cultura de Martim (1950) que consistiu em misturar 10 g de glicose, 5 g de peptona, 1 g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 0,5 g de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 20 g de ágar e 0,033 g de rose bengal. Os ingredientes foram diluídos em 1000 ml de água destilada e autoclavados por 20 minutos, e depois que o meio esfriou a aproximadamente  $40^\circ\text{C}$  adicionou-se sulfeto de estreptomicina para que não houvesse crescimento de bactérias.

Todas as placas de Petri foram encaminhadas para BOD em temperatura constante de  $25^\circ\text{C}$  onde permaneceram durante 20 dias para que as possíveis colônias fúngicas crescessem e se formassem.

Após o período de 20 dias as placas foram retiradas da BOD e as colônias fúngicas foram contadas, e então foram montadas lâminas para a identificação dos fungos em microscópio óptico. As lâminas foram montadas raspando a colônia do meio de cultura e colocando em lâmina com uma gota do corante lactoglicerol e cobrindo a mistura com lamínula.

Figura 5 - Diluição seriada das amostras para caracterização e quantificação dos fungos presentes nos compostos estudados



### 3.6 Análise estatística

Foi avaliada a normalidade e homocedastidade dos dados, aqueles que seguiram distribuição normal foram submetidos a análise de variância e complementados pelo teste de Tuckey a 5% de probabilidade. Para os resultados dos testes de germinação foi realizada a regressão de todas as variáveis em função das datas de coleta. O programa utilizado foi o Agrostat.

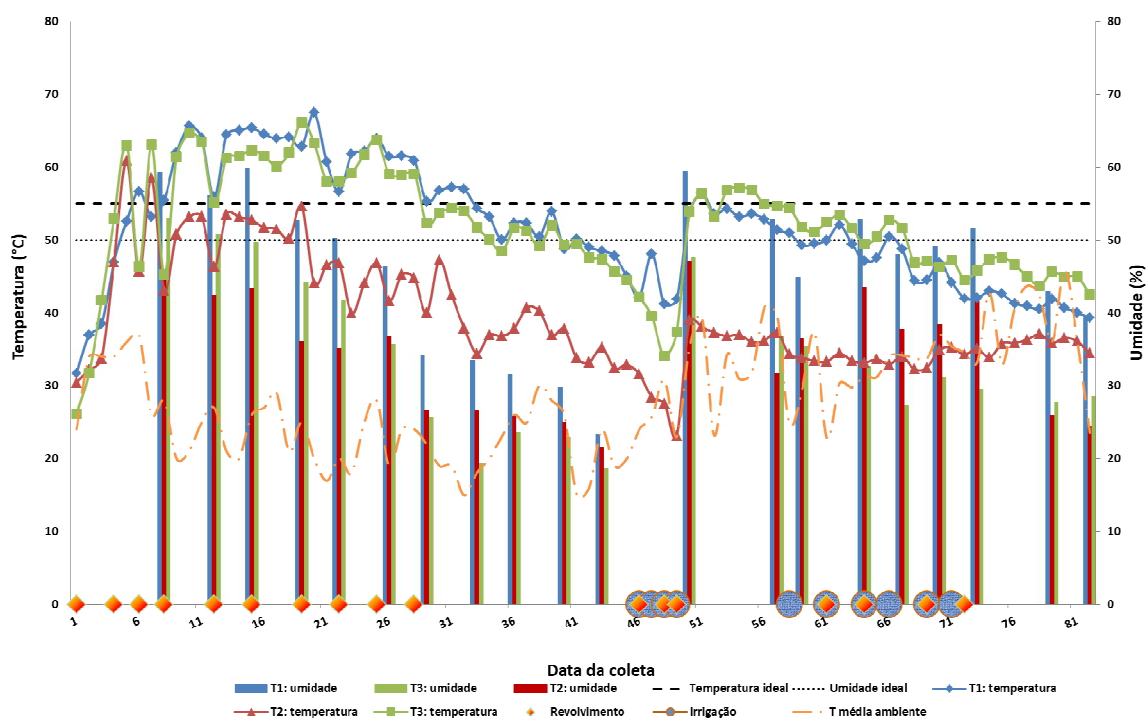
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados obtidos nas leiras de compostagem

#### 4.1.1 Temperatura

Na Figura 6 estão os dados de temperatura do composto desde o 1º até os 90 dias de compostagem. Observando a Figura 6 verificou-se que os compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) ficaram por mais de 15 dias com temperaturas superiores a 55°C. O composto de casca de arroz + lodo de esgoto (T2) ficou por um curto período de tempo nessa faixa de temperatura. De acordo com a Resolução nº481/2017 (CONAMA), em sistemas de compostagem, as temperaturas devem permanecer iguais ou acima de 55°C durante pelo menos 14 dias para eliminação e/ou redução de organismos patogênicos, ou seja, essa seria a temperatura ideal para higienização dos compostos.

Figura 6 - Temperatura e Umidade dos 3 compostos a partir do primeiro dia de compostagem, sendo T1 = bagaço de cana de açúcar+lodo de esgoto, T2 = casca de arroz+lodo de esgoto e T3 = casca de eucalipto+lodo de esgoto.



Por este critério, concluiu-se que os tratamentos T1 e T3 têm condições de serem usados na agricultura sem risco de contaminações de agentes patogênicos para o homem e para o solo.

#### 4.1.2 Umidade

Na Figura 6 observou-se a umidade dos 3 compostos do 1º aos 90 dias de compostagem. É possível verificar que houve queda gradativa da umidade dos compostos até os 40 dias de compostagem, isso ocorreu provavelmente devido ao número de revolvimentos realizados para a incorporação dos materiais. O incremento da umidade nos 3 compostos após os 40 dias de compostagem ocorreu devido a adição de água ao sistema. O procedimento se fez necessário, porque os teores de água ficaram muito baixos, inviabilizando o processo de compostagem. Foram realizadas 10 aplicações de  $28 \text{ L m}^{-3}$  em cada uma das leiras de compostagem a partir dos 45 até os 80 dias de compostagem. As aplicações foram realizadas de 1 a 3 vezes por semana, dependendo da umidade em que o composto estava e da temperatura das leiras de compostagem.

Houve diferença da umidade entre as datas de coletas e entre os tratamentos (Figura 6). O composto de bagaço de cana-de-açúcar (T1) foi o que manteve os maiores níveis de umidade ao longo de todo o processo de compostagem e os compostos de casca de arroz + lodo de esgoto (T2) e de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) tiveram umidades semelhantes ao final do processo de compostagem.

Diante disso pode-se concluir que o composto de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto tem maior capacidade de reter água, o que pode favorecer a atividade microbiológica e o desenvolvimento de culturas.

A IN nº25 de 2009 (MAPA) estabelece que a umidade máxima permitida para fertilizantes orgânicos feitos a partir do lodo de esgoto é de 70%, assim, aos 90 dias de compostagem o composto de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1), apesar de ter o maior teor de água, atenderia essa condição, assim como os compostos de casca de arroz + lodo de esgoto (T2) e casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3).

De acordo com Silva (2007), a umidade interfere diretamente no processo de compostagem pois está ligada a atividade dos microorganismos. Se a umidade estiver abaixo de 40% ocorre redução da atividade biológica e se estiver acima de

60% ocorre obstrução dos espaços entre as partículas, o que dificulta a aeração. Dessa forma, deve-se monitorar a umidade ao longo de todo o processo de compostagem para mantê-la em torno de 50 a 60%. Ao final do processo de compostagem, o ideal é que a umidade esteja entre 20 e 30% para propiciar o transporte e manuseio do material.

## 4.2 Resultados obtidos nas análises laboratoriais

### 4.2.1 pH

Os resultados obtidos para a análise de pH são apresentados na Tabela 3. Verificou-se que houve diferença entre os tratamentos e entre as épocas de coleta, bem como a interação dos fatores estudados.

Tabela 3 - Valores de pH ao natural dos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	pH ao natural			
40	6,00 bB	6,10 abAB	6,25 bcA	6,11b
50	6,82 aB	6,12 aC	7,25 aA	6,73a
60	6,10 bB	5,77 cC	6,45 bA	6,11b
70	5,97 bB	5,85 bcB	6,32 bcA	6,05b
80	5,85 bB	5,67 cB	6,12 cA	5,88c
90	5,42 cB	5,10 dC	6,07 cA	5,53d
Média	6,02B	5,77C	6,41A	
CV	2,05			
	Probabilidade dos valores de F			
T	<0,0001			
E	<0,0001			
T x E	<0,0001			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Os maiores valores de pH foram observados no tratamento casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3), com destaque para a coleta realizada aos 50 dias de compostagem, quando o pH estava mais alcalino em relação as outras épocas de coleta e aos outros tratamentos. Os menores valores de pH foram observados no tratamento casca de arroz + lodo de esgoto (T2), especialmente aos 90 dias de compostagem quando o pH estava mais ácido em relação as outras épocas de coleta e aos outros tratamentos.

Os valores de pH do composto de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) estavam dentro da faixa ótima de pH determinado pela IN nº 25/2009 (MAPA), que determina que este valor deve ser maior ou igual a 6. Os valores de pH dos tratamentos bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e casca de arroz + lodo de esgoto (T2), ficaram abaixo da faixa ótima dos 60 dias de compostagem em diante, especialmente aos 90 dias, quando o pH dos compostos era 5,4 e 5,1, respectivamente. Entretanto, quando se observa as médias dos tratamentos, nota-se que os compostos de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) e de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) estavam dentro da faixa ideal estabelecida pelo MAPA e dentro da faixa considerada ideal para o desenvolvimento da maioria das grandes culturas, valor esse que varia de 6,0 a 6,5 (MALAVOLTA, 1979).

Possivelmente houve diminuição do pH ao longo do processo de compostagem, a medida que a amônia se dispersou no ambiente, através da volatilização. A amônia é uma base forte e sua presença mantém o pH elevado. Os resultados obtidos diferem dos encontrados por diversos pesquisadores (BARREIRA et al., 2006; NORD, 2013; PEDROSA et al., 2013) que estudaram compostagem de diferentes materiais, tais como lixo urbano, frutas, verduras, podas de árvores e esterco de ovinos, e obtiveram pH mais alcalino, com valores variando entre 7,0 e 9,5 ao longo do processo de compostagem. Entretanto esses pesquisadores não fizeram estudo da compostagem do lodo de esgoto.

Galdos et al. (2004), estudaram os efeitos da aplicação de lodo de esgoto em um Latossolo Vermelho Eutroférico, de textura argilosa durante dois anos agrícolas, e observaram que houve redução do pH de 5,4 para 5,0 na camada de 0-5 cm no segundo ano de aplicação de 20,5 Mg ha<sup>-1</sup> de massa seca de lodo de esgoto. Os autores atribuíram essa redução primeiramente ao tratamento do lodo com polieletrólitos e não com calcário, segundo à produção de ácidos orgânicos e inorgânicos como H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e HNO<sub>3</sub> pela decomposição da matéria orgânica do lodo e pela atividade microbiana. Além disso, pode ter ocorrido a redução do pH devido a maior nitrificação induzida pelo aporte de N com a aplicação de lodo de esgoto.

Observando a Tabela 7 verificou-se que houve aumento significativo dos teores de N-NO<sub>3</sub> dos 40 aos 90 dias de compostagem para os compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e casca de arroz + lodo de esgoto (T2), para o composto de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3), esse aumento não foi

significativo. Esse aumento pode indicar que houve nitrificação do N presente no lodo de esgoto.

#### 4.2.2 Condutividade elétrica (C.E.)

Quanto aos valores de condutividade elétrica, houve interação dos fatores e diferença entre os tratamentos e entre as épocas de coleta (Tabela 4).

Tabela 4 - Condutividade elétrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Compostos de lodo de esgoto			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	Condutividade Elétrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ )			
40	5,63 cA	4,54 abB	3,89 aB	4,69 bc
50	7,05 abA	5,80 aB	4,22 aC	5,69 a
60	7,20 aA	4,56 abB	3,29 abC	5,02 ab
70	6,35 abcA	4,36 bB	3,18 abC	4,63 bc
80	5,63 cA	3,70 bB	2,50 bC	3,94 c
90	5,99 bcA	3,83 bB	3,84 aB	4,52 bc
Média	6,29 A	4,46 B	3,49 C	
CV	12,98			
	Probabilidade dos valores de F			
T	< 0,0001			
E	< 0,0001			
T x E	0,0289			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

A maior condutividade elétrica foi observada no tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) aos 60 dias de compostagem e a menor no tratamento casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) aos 80 dias de compostagem.

O aumento da condutividade elétrica reflete aumento da salinidade do composto, o que pode reduzir o potencial osmótico da água no solo. Com isso, o potencial hídrico total na solução do solo fica negativo em relação ao potencial hídrico total da água nas células das raízes e, conseqüentemente, a planta pode perder água para o solo, sofrendo danos fisiológicos que podem ocasionar sua morte (ABREU Jr. et al., 2000).

Além disso, a condutividade elétrica pode ser influenciada pela transformação da matéria orgânica em matéria orgânica humificada, que gera CTC e retém cátions, diminuindo a condutividade elétrica pois esta quantifica os sais solúveis e não os adsorvidos (ABREU Jr et al., 2000; ARAUJO et al., 2009)

Segundo Tomé Jr. (1997), a elevada quantidade de sais na zona radicular prejudica a germinação, a produtividade e o desenvolvimento das plantas, devido ao efeito osmótico que desvia a energia que a planta usaria em processos metabólicos para tentar absorver água. Além disso, podem ocorrer efeitos tóxicos diretos ligados a desarranjos no funcionamento dos sistemas metabólicos das plantas.

Ainda de acordo com Tomé Jr. (1997), em solo superficial ou substratos onde estão sementes, a condutividade elétrica não deve ultrapassar  $4 \text{ mS cm}^{-1}$ , pois poderia ocorrer inibição da germinação, podendo causar efeito negativo à produtividade de culturas sensíveis à salinidade.

Diante disso, podemos dizer que as melhores condutividades elétricas para o desenvolvimento das plantas foram observadas no tratamento casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3), uma vez que seus níveis se mantiveram abaixo de  $4 \text{ mS cm}^{-1}$  ao longo dos 90 dias de compostagem.

#### 4.2.3 N total, N amoniacal e N nítrico

As concentrações de nitrogênio total, amoniacal e nítrico são apresentadas nas Tabelas 5, 6 e 7.

Houve diferença com relação às médias das porcentagens de N total entre os compostos e entre as datas de coletas, não havendo interação dos fatores. (Tabela 5). A porcentagem de N total média do tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) apresentou valores médios de N superiores aos de casca de arroz + lodo de esgoto (T2) e casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3). Com relação às épocas de coleta, os maiores teores foram observados aos 90 dias de compostagem.

Segundo Bertoldi et al. (1983), as concentrações de nitrogênio diminuem durante a compostagem principalmente devido à volatilização da amônia. Por outro lado, pode haver aumento devido a mineralização da matéria orgânica e consequente perda de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , levando a redução na relação C/N do composto. Isso explicaria o ocorrido nos compostos de um modo geral, pois houve aumento na concentração de N total e aumento das médias dos tratamentos da relação C/N (Tabela 9) ao final do processo de compostagem, provavelmente devido a diminuição da concentração de  $\text{CO}_2$ .

Carvalho et al. (2015) relataram que o composto obtido a partir de lodo de lagoas aeradas seguido de decantação misturado com bagaço de cana-de-açúcar



apresentou menores concentrações de N, P e C em relação ao lodo puro devido a 3 fatores. O primeiro seria a diluição das quantidades de N e P pela mistura de materiais vegetais de elevada relação C/N; o segundo seria a degradação parcial do carbono durante o processo de compostagem e o terceiro seria a volatilização de parte do  $\text{NH}_4$  pelas elevadas temperaturas na fase termofílica da compostagem.

A maior concentração de N total observada no tratamento T1 ocorreu provavelmente devido à maior volatilização da amônia nos demais tratamentos, perda de água e carbono no processo. Durante o processo de compostagem, a decomposição da amônia gera alcalinidade no meio, o que aumenta o pH, entretanto, com a perda de  $\text{NH}_3$  para o meio através da volatilização, o pH diminui. No T1 portanto, pode ter ocorrido menor perda de  $\text{NH}_3$  por volatilização, o que fez a concentração de N total ser maior no final do processo.

Tabela 5 - Concentração de nitrogênio total (% base seca) nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	Nitrogênio total (% base seca)			
40	2,23	1,62	1,6	1,81 b
50	2,1	1,62	1,42	1,71 b
60	2,1	1,43	1,67	1,73 b
70	2,18	1,57	1,62	1,79 b
80	2,33	1,27	1,83	1,80 b
90	2,65	1,62	2,12	2,13 a
Média	2,26 A	1,52 C	1,71 B	
CV	13,18			
	Probabilidade dos valores de F			
T		0,0011		
E		< 0,0001		
T x E		0,0876		

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Assim como o relatado para as porcentagens de N total, não houve correlação dos fatores para os resultados de  $\text{N-NH}_4$ , entretanto, houve diferença entre as médias dos tratamentos e entre as médias das datas de coletas. As maiores concentrações de  $\text{N-NH}_4$  foram observadas no tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1), e as concentrações decresceram dos 40 até os 90 dias de compostagem em média para os 3 tratamentos (Tabela 6).

Tabela 6 - Concentração de N-NH<sub>4</sub> (mg kg<sup>-1</sup>) nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	N-NH <sub>4</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )			
40	6994,71	5392,55	4327,30	5571,52 a
50	6935,36	5188,83	3839,17	5321,12 a
60	7007,31	4881,13	3156,04	5014,82 ab
70	6350,45	4695,50	2703,99	4583,31 b
80	5408,82	4122,94	2119,58	3883,78 c
90	4914,20	3283,31	2094,30	3430,60 c
Média	6268,47 A	4594,04 B	3040,06 C	
CV	11,41			
	Probabilidade dos valores de F			
T		< 0,0001		
E		< 0,0001		
T x E		0,3922		

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Com relação às concentrações de N-NO<sub>3</sub>, houve diferença entre as épocas de coleta para os compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e de casca de arroz + lodo de esgoto (T2). Houve diferença entre os tratamentos e também interação dos fatores para os 3 tratamentos estudados. As concentrações de N-NO<sub>3</sub> observadas nos tratamentos bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e casca de arroz + lodo de esgoto (T2) não diferiram entre si e em ambos os casos as concentrações de N-NO<sub>3</sub> foram maiores que do tratamento casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) (Tabela 7). Isso pode ser explicado por dois fatores, o primeiro é que a compostagem casca de arroz + lodo de esgoto (T2) não foi bem sucedida pois o lodo de esgoto e a casca de arroz não se misturaram corretamente, assim, acredita-se que a fração lodo de esgoto compostou e a fração casca de arroz se manteve inerte do começo ao fim do processo. O segundo é que para o composto de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) pode ter ocorrido maior mineralização da matéria orgânica na compostagem, levando a um incremento de quase 9 vezes nas concentrações de N-NO<sub>3</sub> comparando-se as avaliações realizadas aos 40 e aos 90 dias compostagem. As maiores concentrações de N-NO<sub>3</sub> ocorreram aos 90 dias de compostagem e as menores aos 40 dias de compostagem, resultado inverso do que foi observado para N-NH<sub>4</sub> (Tabela 6), provavelmente devido ao processo de nitrificação.

Côrrea et al. (2006) avaliaram o comportamento do N nos processos de compostagem e observaram que 32% do N mineral ( $N-NH_4 + N-NO_3$ ) se perdeu nos 2 primeiros dias de compostagem, antes que as pilhas atingissem temperaturas termofílicas. Quando a compostagem atingiu temperaturas acima de 45°C, as concentrações de N mineral dobraram nas 48 horas seguintes e continuaram aumentando até atingir 486 mg kg<sup>-1</sup>. Os autores constataram ainda que o  $N-NO_3$  foi encontrado em baixas concentrações a partir do 12º dia de compostagem, correspondendo com o pico de  $N-NH_4$ . As nitrificações só aconteceram na fase de maturação do composto, quando foi observado aumento de 10 vezes nas concentrações de  $N-NO_3$ . A compostagem terminou aos 34 dias, com aproximadamente metade das concentrações de  $N-NH_4$  em relação a concentração inicial.

Tabela 7 - Concentração de  $N-NO_3$  (mg kg<sup>-1</sup>) nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	$N-NO_3$ (mg kg <sup>-1</sup> )			
40	62,70 bA	67,97 bA	96,13 aA	75,60 c
50	205,15 bA	221,02 abA	79,95 aA	168,71 bc
60	596,55 aA	209,56 abB	99,98 aB	302,03 ab
70	157,24 bA	311,09 abA	78,58 aA	182,30 bc
80	391,73 abA	523,27 aA	84,36 aB	333,12 ab
90	549,06 aA	489,59 aA	175,75 aB	404,80 a
Média	327,07 A	303,75 A	102,46 B	
CV	64,48			
	Probabilidade dos valores de F			
T	< 0,0001			
E	< 0,0001			
T x E	0,0068			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Os resultados de Côrrea et al., (2006) corroboram aos obtidos no presente trabalho em relação aos compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e de casca de arroz + lodo de esgoto (T2), uma vez que, ao final da compostagem, as concentrações médias de  $N-NH_4$  eram aproximadamente a metade das concentrações encontradas aos 40 dias. Além disso, as concentrações de  $N-NO_3$  eram cerca de 5 vezes maiores ao final dos 90 dias de compostagem em relação aos 40 dias, quando começaram as análises e as coletas.

As concentrações médias de amônio diminuíram ao longo do processo de compostagem, ocorrendo efeito inverso em relação a concentração de nitrato, nos compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e de casca de arroz + lodo de esgoto (T2), para o composto de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) não houve diferença estatística entre as datas de coleta, entretanto observando os valores da Tabela 6, pode-se constatar que o valor das concentrações de N-NO<sub>3</sub> encontrado aos 40 dias foi menor que o valor encontrado aos 90 dias. O processo de nitrificação foi possível porque o pH que se manteve acima de 5,0 e atendeu a necessidade das bactérias nitrificadoras (COSTA et al., 2006, DANCER et al., 1973).

#### 4.2.4 Carbono total (C)

As concentrações de C total nos compostos são apresentadas na Tabela 8. Não houve diferença entre os tratamentos, nem interação dos fatores. Houve diferença entre as épocas de coleta, sendo que a maior concentração média de C total ocorreu aos 40 dias de compostagem, apresentando pequena redução ao longo do tempo.

As concentrações de matéria orgânica e de carbono total estão ligadas, uma vez que os microorganismos utilizam o carbono da matéria orgânica para obter energia para formar o composto (SILVA, 2007).

Mattos et al. (1998) realizaram um estudo de compostagem com bagaço de cana de açúcar, palha de café, capim napier e água residuária da suinocultura e observaram que houve redução das concentrações de carbono total para todos os tratamentos estudados ao longo de 120 dias de compostagem.

A IN n<sup>o</sup> 25 (MAPA) estabelece o valor mínimo de 15% de carbono orgânico para compostos orgânicos. Observando os resultados da Tabela 6, verificou-se pequena redução dos teores de carbono ao longo do processo de compostagem, isso pode ter acontecido devido a mineralização do material orgânico pela compostagem (CORRÊA et al., 2006). A partir dos 60 dias de compostagem houve estabilização das concentrações de carbono. Isso pode ser explicado pela possível redução da atividade microbiana, responsável pelo consumo do carbono presente no meio para realização da compostagem.

Tabela 8 - Concentração de C total (% base seca) nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	C total(% base seca)			
40	39,26	39,25	42,50	40,33 a
50	36,25	35,25	41,50	37,66 ab
60	37,00	35,00	39,00	37,00 ab
70	37,00	40,75	37,50	38,41 ab
80	34,00	36,00	37,75	35,25 b
90	36,25	38,75	37,50	37,50 ab
Média	36,62	37,50	38,95	
CV	8,91			
	Probabilidade dos valores de F			
T		0,0607		
E		0,0193		
T x E		0,2943		

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

A partir dos resultados de C total pode-se verificar que a maior concentração de matéria orgânica foi aos 40 dias de compostagem, e a menor foi aos 80 dias de compostagem, apresentando pequena redução ao longo do tempo, concordando com Andreoli et al. (2001) que citaram ser um dos objetivos do tratamento do lodo de esgoto a redução do teor de matéria orgânica. Entretanto, Silva (2007) relata que a aplicação do composto orgânico no solo aumenta os teores de matéria orgânica e pode melhorar as características físicas, químicas e biológicas. O processo de compostagem transforma a matéria orgânica em um produto seco, uniforme e biologicamente estável que pode ser utilizado como uma boa fonte de nutrientes para as plantas (SULLIVAN et al., 2002).

Diante do exposto pode-se verificar que não houve diferença quanto a bioestabilização dos 3 compostos estudados, pois os teores médios de C total eram próximos ao final dos 90 dias. Verifica-se ainda que, em média, a bioestabilização ocorreu ao final dos 80 dias de compostagem, pois foi quando os compostos tinham menores teores médios de C total (Tabela 7).

Entre os três tratamentos, a casca de arroz e o lodo de esgoto não proporcionaram mistura homogênea, sendo observadas pequenas esferas de lodo de esgoto envolvidas com casca de arroz ao longo de todo o processo, o que possivelmente gerou valores "outline" na curva de resposta em relação à concentração de C total.

#### 4.2.5 Relação C/N

Os valores da relação C/N dos compostos em função dos dias de compostagem estão na Tabela 9. Observou-se que aos 90 dias de compostagem os compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) tinham as menores relações C/N e que esses valores estavam abaixo de 20. A relação C/N do composto de casca de arroz + lodo de esgoto (T2) era maior que a dos outros dois compostos e estava acima de 20 (Tabela 9). Esse fato pode ser explicado possivelmente porque não houve completa decomposição da casca de arroz.

A relação C/N é de suma importância para os compostos orgânicos, uma vez que o carbono é a fonte de energia para os microorganismos, e esses precisam de nitrogênio para sintetizar proteínas. A falta de um dos elementos limita a atividade microbiológica (SILVA, 2007).

Tabela 9 - Relação C/N nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	C/N			
40	17,00 aB	24,25 aA	26,25 abA	22,50
50	18,00 aB	22,25 aB	29,25 aA	23,16
60	18,00 aB	25,75 aA	24,50 abcAB	22,75
70	17,00 aB	26,50 aA	24,00 abcA	22,50
80	15,00 aB	28,25 aA	19,50 bcB	20,91
90	13,75 aB	24,25 aA	17,75 cAB	18,58
Média	16,45 B	25,20 A	23,54 A	
CV	18,53			
	Probabilidade dos valores de F			
T	<0,0001			
E	0,0678			
T x E	0,0459			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Bertoldi et al. (1983) relataram que baixas relações C/N no início da compostagem podem provocar retardamento no processo de decomposição e aumento da perda de N. Relações C/N iniciais elevadas fazem com que sejam necessários vários ciclos de vida dos microorganismos até que oxidem o excesso de carbono afim de reduzir a relação C/N a valores próximos de 10, mais adequados ao metabolismo dos microorganismos.

Santos et al. (2017) avaliaram o potencial agrônomo e o efeito da secagem em leitos de secagem de lodo de esgoto nas características microbiológicas e físico-químicas do lodo de esgoto e relataram que houve redução da relação C/N durante o período de 90 dias do estudo. Resultados que corroboram os encontrados para o tratamento T3 (casca de eucalipto + lodo de esgoto), pois houve redução nos valores de relação C/N dos 40 para os 90 dias de compostagem. A redução da relação C/N dos 40 aos 90 dias de compostagem pode ser explicada pela decomposição do C da casca de eucalipto pelos microorganismos, consolidando o processo de compostagem. Entretanto, ao final do processo de compostagem a relação C/N não foi inferior a 20 porque a casca de eucalipto é um material muito desuniforme que contém partículas grosseiras de madeira.

A relação C/N do composto de lodo com casca de árvore triturada se assemelha a dos solos o que facilitaria a decomposição do composto porque o processo de mineralização é favorecido quando a relação C/N dos materiais é inferior a 20/1 (LORENZ E LAL, 2009; MORETTI et al., 2015).

Na IN nº 25 (MAPA) e na Resolução no 481/2017 (CONAMA) os valores máximos de relação C/N permitidos para compostos orgânicos devem ser iguais ou inferiores a 20, nesse sentido os compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) é o único que se manteve dentro dos padrões legais dos 40 ao final dos 90 dias de compostagem. O composto de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) atingiu esses valores a partir dos 80 dias de compostagem e foi o tratamento que apresentou maior velocidade de decomposição da matéria orgânica ao longo do processo de compostagem pois foi de 26 para 18 no mesmo intervalo de tempo que o composto T1 foi de 17 para 14 e o T2 se manteve em 24.

A menor decomposição do tratamento casca de arroz + lodo de esgoto evidencia-se também no comportamento da relação C/N, que se manteve praticamente estável ao longo do processo de compostagem.

#### 4.2.6 Fósforo ( $P_2O_5$ )

Os resultados referentes às concentrações de  $P_2O_5$  estão na Tabela 10. Entre os 3 compostos estudados, as maiores concentrações de  $P_2O_5$  foram observadas no tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) em todas as avaliações realizadas, possivelmente pelo fato de o bagaço de cana-de-açúcar ter maior concentração de  $P_2O_5$  em sua composição (Tabela 1).

Tabela 10 - Concentração de  $P_2O_5$  (% base seca) nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	$P_2O_5$ (% base seca)			
40	2,02 cA	1,02 aB	0,97 cB	1,34 b
50	2,65 abcA	1,57 aB	1,17 bcB	1,80 a
60	2,15 bcA	1,30 aB	1,60 abcB	1,68 ab
70	2,27 abcA	1,45 aB	1,57 abcB	1,76 a
80	2,70 abA	1,20 aC	1,80 abB	1,90 a
90	2,80 aA	1,32 aC	1,92 aB	2,01 a
Média	2,43 A	1,31 B	1,50 B	
CV	17,16			
	Probabilidade dos valores de F			
T	< 0,0001			
E	< 0,0001			
T x E	0,0139			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

A concentração de  $P_2O_5$  apresentou o mesmo comportamento do  $N-NO_3$  total (Tabela 7), aumentando ao longo do processo de compostagem. Como não há perda de  $P_2O_5$  para o meio, a concentração se dá exclusivamente pela liberação de  $CO_2$ . Houve menor decomposição do T2 ao longo do processo, pois a estrutura da casca de arroz não se desfez, o que evidencia-se pelo comportamento praticamente estável da concentração de  $P_2O_5$  ao longo do processo.

Fosfatos são recursos naturais não renováveis e escassos (ARAUJO et al., 2008). De modo geral, as culturas apresentam baixa eficiência de absorção de P e o elemento tem alta taxa de fixação no solo, o que leva a maior necessidade de adição de fósforo aos solos agrícolas (ZUBA Jr. et al., 2011). Assim, a adição de composto orgânico rico em  $P_2O_5$  é uma boa alternativa para melhorar esse fator.

Vaca et al. (2011) estudaram o efeito de lodos de esgoto e de compostos de lodo de esgoto nas características e rendimento do milho e observaram que houve aumento nas concentrações de fósforo no solo nos tratamentos com lodo de esgoto e com composto de lodo de esgoto se comparados ao tratamento com adubação mineral. Altas quantidades de materiais protéicos e a presença de polifosfatos no lodo de esgoto, podem aumentar os teores de N e P no lodo compostado e conseqüentemente no solo, quando aplicado a ele.



#### 4.2.7 Potássio (K<sub>2</sub>O)

Não houve diferença entre as épocas de coleta para os resultados obtidos em relação as análises de concentração de K<sub>2</sub>O, entretanto, houve diferença entre os tratamentos e interação dos fatores. Não houve diferenças entre as porcentagens de K<sub>2</sub>O entre os tratamentos T2 (casca de arroz + lodo de esgoto) e T3 (casca de eucalipto + lodo de esgoto), sendo as menores porcentagens observadas no T1 (bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto) (Tabela 11).

Mesmo havendo diferença entre os tratamentos, nota-se que as concentrações de K<sub>2</sub>O foram muito baixas em todos os compostos. Isso pode ser explicado pelo fato de o lodo de esgoto apresentar baixos teores de K<sub>2</sub>O (Tabela1). De acordo com Kiehl (1985), resíduos orgânicos que serão compostados têm maior proporção de nitrogênio do que de fósforo e potássio.

Tabela 11 - Concentração de K<sub>2</sub>O (% base seca) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	K <sub>2</sub> O (% base seca)			
40	0,10 aB	0,20 aA	0,20 aA	0,16 a
50	0,10 aB	0,20 aA	0,20 aA	0,16 a
60	0,15 aA	0,12 bA	0,17 abA	0,15 a
70	0,12 aB	0,20 aA	0,15abAB	0,15 a
80	0,12 aB	0,20 aA	0,12 bB	0,15 a
90	0,10 aB	0,10 bB	0,20 aA	0,13 a
Média	0,11 B	0,17 A	0,17 A	
CV	21,16			
	Probabilidade dos valores de F			
T	< 0,0001			
E	0,1284			
T x E	< 0,0001			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p≤0,05).

#### 4.2.8 Cálcio (Ca)

Houve diferença entre os compostos e interação dos fatores com relação às concentrações de Ca, não havendo diferença entre as épocas de coleta para os compostos de bagaço de cana-de-açúcar (T1) e de casca de arroz + lodo de esgoto (T3). Para o composto de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) houve diferença entre as épocas de coleta. As maiores concentrações de Ca foram observadas no tratamento casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3), exceto aos 50 e aos 70 dias de

compostagem, quando as concentrações de Ca não diferiram dos compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e de casca de arroz + lodo de esgoto (T2) respectivamente. (Tabela 12).

Tabela 12 - Concentrações de Ca (% base seca) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	Ca (% base seca)			
40	1,10 aB	0,62 aC	1,95 abA	1,22 a
50	0,97 aAB	0,75 aB	1,32 cA	1,01 a
60	0,85 aB	0,65 aB	1,42 cA	0,97 a
70	0,92 aB	1,00 aAB	1,40 cA	1,10 a
80	1,05 aB	0,72 aB	1,52 bcA	1,10 a
90	0,85 aB	ND	2,20 aA	1,01 a
Média	0,95 B	0,62 C	1,63 A	
CV	23,13			
	Probabilidade dos valores de F			
T	< 0,0001			
E	0,1770			
T x E	< 0,0001			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). ND = não detectado  $< 0,1\%$  ou  $< \text{mg kg}^{-1}$ .

Rodrigues et al. (2016a) estudaram a compostagem de lodo flotado da estação de tratamento de efluentes de laticínios em Frederico Westphalen – RS e observaram que, após a maturação do composto, as concentrações de Ca eram de 0,7%. Tais valores estão próximos aos obtidos nesse trabalho para o composto de casca de arroz + lodo de esgoto (T2), entretanto são inferiores aos dos compostos de bagaço de cana-de-açúcar+lodo de esgoto (T1) e de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3).

Sanes et al. (2015) estudaram a compostagem e a fermentação de resíduos de peixe com casca de arroz “in natura” e casca de acácia esgotada (denominação dada devido ao processo de extração de tanino com água, altas temperaturas e pressão) para a produção de compostos e fertilizantes orgânicos líquidos e observaram que, nas duas compostagens realizadas em épocas diferentes, os compostos apresentaram teores de cálcio entre 2,9 e 10%, valores novamente bem superiores aos apresentados nesse estudo.

As baixas concentrações de Ca observadas (Tabela 12) nos diferentes tratamentos do presente trabalho podem ser explicadas devido a baixa concentração desse elemento nos materiais utilizados inicialmente na compostagem (Tabela 1).

#### 4.2.9 Magnésio (Mg)

Houve diferença entre as épocas de coleta, entre os tratamentos e interação dos fatores quanto às concentrações de Mg. As menores médias das concentrações de Mg foram observadas aos 90 dias de compostagem, quando os valores chegaram a zero e as maiores concentrações ocorreram aos 50 e 60 dias de compostagem (Tabela 13). As concentrações médias de Mg observadas nos tratamentos bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) foram semelhantes e maiores que a observada no tratamento casca de arroz + lodo de esgoto (T2).

Tabela 13 - Concentrações de Mg (% base seca) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	Mg (% base seca)			
40	0,15 aAB	0,10 bB	0,17 abA	0,14 b
50	0,20 aA	0,20 aA	0,20 abA	0,20 a
60	0,20 aA	0,12 abB	0,17 abAB	0,16 ab
70	0,20 aAB	0,17 abB	0,25 aA	0,20 a
80	0,20 aA	0,12 abB	0,12 bcB	0,15 b
90	ND	ND	0,07 cA	0,02 c
Média	0,15 A	0,12 B	0,16 A	
CV	27,84			
Probabilidade dos valores de F				
T				0,0007
E				<0,0001
T x E				0,0380

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). ND = não detectado < 0,1% ou < mg kg<sup>-1</sup>.

No estudo de Rodrigues et al. (2016a) as concentrações de Mg eram de 0,24% ao final do estudo. Os valores de Mg encontrados pelos pesquisadores estão um pouco acima dos encontrados no presente trabalho para os três compostos estudados. Entretanto Sanes et al. (2015) observaram concentrações de Mg de 0,10 a 0,20% no final da compostagem, valores mais próximos aos encontrados no presente trabalho para os compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3). O composto de casca de arroz + lodo de esgoto (T2) teve resultados inferiores aos obtidos por Rodrigues et al. (2016a) e por Sanes et al. (2015). O material inicial utilizado no estudo de Sanes et al. (2015) continha baixas concentrações iniciais de Mg, assim como no presente

trabalho, o que pode explicar as baixas concentrações do nutriente no composto em todas as amostragens.

#### 4.2.10 Enxofre (S)

Na Tabela 14 verifica-se que houve diferença entre as épocas de coleta, entre os tratamentos e interação dos fatores quanto às concentrações de S. Aos 40 dias de compostagem os teores de S eram mais elevados no composto de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1), os compostos de casca de arroz + lodo de esgoto (T2) e de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) não diferiram entre si. Dos 50 aos 70 dias de compostagem não houve diferença entre os 3 compostos em relação aos teores de S. Aos 90 dias de compostagem os teores de S foram maiores para os compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3), diferindo do composto de casca de arroz + lodo de esgoto (T2) (Tabela 14).

Tabela 14 - Concentrações de S (% base seca) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	S (% base seca)			
40	2,12 aA	1,52 aB	1,45 abB	1,70 a
50	1,40 bA	1,02 abA	1,00 bA	1,14 c
60	1,37 bA	1,00 bA	1,07 bA	1,15 c
70	1,37 bA	1,05 abA	1,15 bA	1,19 bc
80	1,62 abA	1,22 abAB	1,10 bB	1,31 bc
90	1,92 aA	0,77 bB	1,75 aA	1,48 ab
Média	1,63 A	1,10 B	1,25 B	
CV	18,33			
	Probabilidade dos valores de F			
T		<0,0001		
E		<0,0001		
T x E		0,0016		

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Para os compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) observou-se queda nos teores de S dos 40 70 e dos 40 aos 80 dias de compostagem respectivamente.

Budziak et al. (2004) analisando amostras de ácidos húmicos extraídos ao longo do processo de compostagem de lodo de esgoto com serragem de pinus observaram redução das concentrações de S ao longo de 29 dias de compostagem.

#### 4.2.11 Sódio (Na)

Conforme a Tabela 15, as menores concentrações de Na foram observadas no tratamento casca de arroz + lodo de esgoto (T2), não havendo diferenças entre os tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3). Também não houve diferença entre as épocas de coleta dos 40 aos 80 dias de compostagem, entretanto, aos 90 dias se observou a menor concentração média de Na (Tabela 15).

Tabela 15 - Concentrações de Na ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem)

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	Na ( $\text{mg kg}^{-1}$ )			
40	676,00	574,75	686,50	645,75 a
50	763,50	611,25	691,25	688,66 a
60	728,25	586,25	691,25	668,58 a
70	721,00	615,75	727,00	687,91 a
80	696,75	566,50	727,50	663,58 a
90	610,00	452,75	653,00	571,91 b
Média	699,25 A	567,87 B	696,08 A	
CV	7,62			
	Probabilidade dos valores de F			
T	<0,0001			
E	<0,0001			
T x E	0,3261			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

A IN nº25/2009(MAPA) não estabelece níveis máximos de sódio para fertilizantes orgânicos. No estudo de Rodrigues et al. (2016a) sobre compostagem de lodo de efluentes de tratamento de laticínios, as concentrações de Na foram em torno de 0,02 %, valores considerados baixos pelos autores.

As concentrações de sódio obtidas nos 3 compostos foram cerca de seis vezes maiores que as observadas por Rodrigues et al. (2016b). Altos teores de Na podem prejudicar a germinação e desenvolvimento inicial de plantas, pois ocasionam elevação da condutividade elétrica de compostos.

#### 4.2.12 Boro (B)

Com relação às concentrações de B, houve diferença entre os compostos, épocas de coleta e interação dos fatores. As maiores concentrações de B foram

observadas no tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) aos 40 e 50 dias de compostagem. Dos 60 aos 90 dias de compostagem não houve diferença quanto aos teores de B entre os compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3). De um modo geral as menores concentrações de B foram observadas para o composto de casca de arroz + lodo de esgoto ao longo (T2) do processo de compostagem (Tabela 16).

Em todos os tratamentos as concentrações de B foram inferiores aos valores mínimos estabelecidos na IN nº25/2009 (MAPA), que é de 300 mg kg<sup>-1</sup> ou 0,03% do micronutriente para fertilizantes orgânicos sólidos aplicados ao solo.

Tabela 16 - Concentrações de B (mg Kg<sup>-1</sup>) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	Boro (mg Kg <sup>-1</sup> )			
40	110,25 abA	62,50 abB	78,00 bcB	83,58 c
50	127,75 aA	77,25 abB	67,25 cB	90,75 bc
60	110,00 abA	60,00 abB	98,00 bcA	89,33 bc
70	127,50 aA	92,75 aB	107,50 bAB	109,25 ab
80	136,50 aA	73,75 abB	158,00 aA	122,75 a
90	88,25 bA	49,50 bB	88,75 bcA	75,50 c
Média	116,70 A	69,29 C	99,58 A	
CV	19,06			
	Probabilidade dos valores de F			
T	<0,0001			
E	<0,0001			
T x E	0,0005			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

#### 4.2.13 Cobre (Cu)

Com relação às concentrações de Cu nos compostos, as maiores médias dos teores de Cu foram obtidas aos 70 dias de compostagem e as menores aos 40 dias. A maior concentração média de Cu foi obtida no tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1), seguida pelos tratamentos casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) e casca de arroz + lodo de esgoto (T2), respectivamente (Tabela 17). Mesmo aos 80 e 90 dias de compostagem, quando observou-se as maiores concentrações de Cu, da mesma forma que o observado para o B, não foram atingidos os teores mínimos estabelecidos pela IN nº 25/2009 (MAPA) (500 mg kg<sup>-1</sup> ou 0,05%), ficando muito aquém dos níveis máximos permitidos pelo CONAMA

através das Resoluções nºs 375/2006 e 380/2006 (CONAMA) (1500 mg kg<sup>-1</sup> ou 0,15%). O Cu, apesar de ser um micronutriente essencial para o desenvolvimento das plantas, quando em elevadas concentrações pode contaminar o solo e a água, uma vez que o elemento é também um metal pesado (RODRIGUES et al., 2016; ZUBA Jr. et al., 2011).

Tabela 17 - Concentrações de Cu (mg Kg<sup>-1</sup>) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )			
40	74,75	49,00	50,50	58,08 e
50	271,75	245,25	247,50	254,83 c
60	284,75	268,00	288,50	280,42 b
70	320,25	302,50	310,00	313,91 a
80	332,75	307,75	326,75	322,41 a
90	102,25	54,25	74,50	77,00 d
Média	231,08 A	204,45 C	217,79 B	
CV	5,75			
	Probabilidade dos valores de F			
T	<0,0001			
E	<0,0001			
T x E	0,1091			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p≤0,05).

#### 4.2.14 Ferro (Fe)

Não houve diferença entre as concentrações de Fe em função das épocas de coleta, entretanto, houve interação dos fatores e diferença entre os tratamentos estudados. Dentro desse contexto as concentrações de Fe foram maiores para o composto de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) aos 40 e aos 50 dias de compostagem. A partir do 60 dias de compostagem não houve diferença entre os compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) e ambos os tratamentos apresentaram maiores teores do micronutriente em relação ao composto de casca de arroz + lodo de esgoto (Tabela 18).

A IN nº25/2009(MAPA) estabelece que as concentrações mínimas de Fe para fertilizantes orgânicos que serão adicionados ao solo não podem ser inferiores a 2000 mg kg<sup>-1</sup> ou 0,2%. As concentrações de Fe dos 3 compostos estudados foram

muito superiores aos mínimos estabelecidos pelo MAPA ao longo dos 90 dias de compostagem.

Tabela 18 - Concentrações de Fe ( $\text{mg Kg}^{-1}$ ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	Fe ( $\text{mg Kg}^{-1}$ )			
40	24611,75 A	13165,00 B	15975,50B	17917,41
50	25338,75 A	15314,75 B	12865,50 B	17839,66
60	21240,50 A	12259,00 B	17892,50 AB	17130,66
70	22701,00 A	14253,50 B	20808,00 A	19254,16
80	26357,00 A	11939,50 B	21389,00 A	19895,16
90	24200,00 A	10298,75 B	20300,25 A	18266,33
Média	24074,83 A	12871,75 B	18205,12 A	
CV	20,12			
	Probabilidade dos valores de F			
T	<0,0001			
E	0,4871			
T x E	0,0390			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

#### 4.2.15 Manganês (Mn)

As concentrações de Mn são observadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Concentrações de Mn ( $\text{mg Kg}^{-1}$ ) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	Mn ( $\text{mg Kg}^{-1}$ )			
40	192,25 aC	298,00 bcB	418,50 aA	302,91 b
50	242,75 aB	402,25 abA	390,75 aA	245,21 ab
60	222,00 aB	364,50 abcA	452,00 aA	346,16 ab
70	236,75 aB	429,25 aA	485,25 aA	383,75 a
80	270,25 aC	369,50 abcB	495,75 aA	378,50 a
90	210,50 aB	277,75 cB	491,50 aA	326,58 ab
Média	229,08 C	356,87 B	455,62 A	
CV	15,28			
	Probabilidade dos valores de F			
T	0,0036			
E	<0,0001			
T x E	0,0248			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).



Pode-se notar que houve diferença estatística entre os tratamentos e as épocas de coleta, e ocorreu interação dos fatores. As maiores concentrações de Mn foram observadas no tratamento casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) aos 40, 80 e 90 dias de compostagem (Tabela 19).

A IN nº25/2009 (MAPA) recomenda o mínimo de 500 mg kg<sup>-1</sup> ou 0,05% de Mn para fertilizantes orgânicos aplicados aos solos, nenhum dos 3 tratamentos apresentou tais teores do nutriente.

#### 4.2.16 Zinco (Zn)

Quanto às concentrações de Zn, na Tabela 20 pode-se observar que houve diferença entre os tratamentos, épocas de coleta e interação dos fatores, sendo as maiores concentrações observadas no tratamento de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1). O composto de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto observou-se as menores concentrações de Zn aos 40 e aos 90 dias de compostagem, não havendo diferença entre as coletas realizadas aos 50, 60, 70 e 80 dias de compostagem.

Tabela 20 - Concentrações de Zn (mg Kg<sup>-1</sup>) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	Zn (mg Kg <sup>-1</sup> )			
40	340,50 bA	178,75bcB	176,25 cB	231,83 c
50	444,75 aA	289,25 aB	227,00 bcB	320,33 ab
60	384,00 abA	258,00 abcB	301,00 abB	314,33 ab
70	421,50 abA	297,25 aB	318,25 abB	345,66 a
80	465,75 aA	268,75 abC	350,50 aB	361,66 a
90	381,50abA	173,75 cC	252,50 bcB	269,25 bc
Média	406,33 A	244,29 B	270,91 B	
CV	14,27			
	Probabilidade dos valores de F			
T	<0,0001			
E	<0,0001			
T x E	0,0266			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p≤0,05).

Assim como o cobre, o zinco é um metal pesado e seus excessos podem causar contaminação no solo. A IN nº 25/2009 (MAPA) estabelece que fertilizantes orgânicos devem ter no mínimo 1000 mg kg<sup>-1</sup> ou 0,1% de Zn em sua composição e

as Resoluções nºs 375/2006 e 380/2006 (CONAMA) estabelecem que fertilizantes orgânicos não podem ter mais que 2800 mg kg<sup>-1</sup> ou 0,28% do elemento para serem usados na agricultura.

Nos 3 tratamentos os níveis de Zn permaneceram abaixo do máximo permitido pelas Resoluções nºs 375/2006 e 380/2006 (CONAMA) e em nenhum dos 3 tratamentos os níveis do elemento atingiram o mínimo estabelecido pela IN nº 25/2009 (MAPA).

#### 4.2.17 Metais pesados

Observando os resultados na Tabela 21, verificou-se que não houve interação dos fatores para nenhum dos metais pesados. Para as concentrações de As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Mo e Zn houve diferença em função dos tratamentos, sendo que as maiores concentrações desses elementos foram observadas no tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) para Ba, Pb, Cu e Mo; para As, Cd e Cr não houve diferença entre os tratamentos bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e casca de arroz + lodo de esgoto (T2), sendo que ambos tiveram concentrações dos elementos maiores que as observadas para casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3).

Tabela 21 - Metais pesados (mg kg<sup>-1</sup>) nos três compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em duas épocas de coleta (40 e 90 dias de compostagem).

	Tratamentos			Época de coleta		CV	Probabilidade dos valores de F		
	T1	T2	T3	40	90		T	E	TxE
As	2,9 A	2,4 A	2,2 B	2,4 a	2,6 a	0,52	0,045	0,328	0,831
Ba	132 A	105 B	101 B	101 b	124 a	16,13	0,002	0,003	0,500
Cd	0,7 A	0,7 A	0,6 B	0,7 a	0,7 a	0,06	0,049	0,539	0,547
Pb	9,4 A	7,3 B	7,2 B	7,5 a	8,5 a	1,3	0,004	0,066	0,486
Cu	82 A	60 B	63 B	61 b	75 a	8,4	0,001	0,001	0,356
Cr	71 A	67 A	49 B	59 a	65 a	11,8	0,004	0,245	0,246
Hg	2	2	2	2	2	NS	NS	NS	NS
Mo	27 A	19 B	19 B	21 a	22 a	1,7	0,001	0,071	0,436
Ni	4,9 A	6,7 A	3,8 A	4,7 a	5,6 a	2,8	0,137	0,399	0,124
Se	6	6	6	6	6	NS	NS	NS	NS
Zn	300 A	224 B	226 B	227 a	273 a	32,6	0,001	0,002	0,415

Letras maiúsculas e minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey (p≤0,05). NS: não significativo. T1=BC+LE, T2=CA+LE, T3=CE+LE.

Para as concentrações de Ba e Cu também houve diferença entre as épocas de coleta, sendo que em ambos os casos as maiores concentrações foram observadas aos 90 dias de compostagem.

Era esperado que os maiores teores de metais pesados fossem observados aos 90 dias de compostagem, uma vez que, devido ao processo de compostagem houve redução do volume de material, deixando o produto mais concentrado, o que levou a concentração dos elementos nas amostras. Entretanto, não era esperado que houvesse diferença entre os tratamentos, pois as proporções volumétricas de fontes de carbono e lodo de esgoto foram as mesmas. Isso pode ser explicado pelo fato de apesar de os compostos estarem bioestabilizados, os mesmos ainda não haviam atingido a maturação completa, o que levou a pequena desuniformidade entre os produtos.

Na Tabela 22 estão as as concentrações máximas permitidas de metais pesados em lodo de esgoto e derivados estabelecidos pelas Resoluções n<sup>os</sup> 375/2006 e 380/2006 (CONAMA).

Tabela 22 - Concentrações máximas de metais pesados permitida pelas Resoluções nos 375/2006 e 380/2006 (CONAMA).

Metal Pesado	Concentração máxima permitida em mg kg <sup>-1</sup> (base seca)
Arsênio (As)	41
Bário (Ba)	1300
Cádmio (Cd)	39
Chumbo (Pb)	300
Cobre (Cu)	1500
Cromo (Cr)	1000
Mercúrio (Hg)	17
Molibdênio (Mo)	50
Níquel (Ni)	420
Selênio (Se)	100
Zinco (Zn)	2800

Adaptada de CONAMA, 2006.

Observando os dados apresentados na Tabela 22 e comparando os mesmos com os resultados obtidos e apresentados na Tabela 21, notou-se que as concentrações de todos os metais pesados presentes nos 3 tratamentos e nas duas datas de coleta foram muito inferiores ao permitido pela legislação vigente no país.

Isso mostrou que os compostos produzidos a partir do lodo de esgoto da estação de tratamento de esgoto de Botucatu – SP, atendem esse pré-requisito legal, e podem ser utilizados na agricultura.

De acordo com Mesquita et al. (2017), metais pesados são tóxicos quando estão em concentrações elevadas, acima do limite estabelecido pelo CONAMA. A preocupação ambiental em relação às áreas em que há acúmulo de metais pesados se agrava quando estes entram na cadeia alimentar. Assim, é importante que se saiba as formas químicas dos metais no solo, afim de melhor avaliar a biodisponibilidade, mobilidade e riscos dos metais pesados ao meio ambiente (ABREU et al., 1995; COLLIER et al., 2004).

Segundo Nogueira et al. (2007), o acúmulo de metais pesados nas plantas pode acontecer sem manifestação sintomática de toxidez ou redução na produtividade. Este acúmulo pode aumentar a atividade dos microorganismos presentes no solo (VALSECCHI et al., 1995) e alterar a qualidade dos alimentos (SOARES et al., 2002).

#### 4.2.18 Granulometria

Na Tabela 23 verifica-se os resultados das médias encontradas na análise granulométrica dos 3 tratamentos aos 40 e aos 90 dias de compostagem. Na Tabela 24 verifica-se a especificação granulométrica de fertilizantes orgânicos estabelecidas pela IN nº25/2009 (MAPA).

Tabela 23 - Porcentagem média da amostra passante no jogo de peneiras com malhas de 4 mm, 3,35 mm, 1 mm, e 0,3 mm para amostras dos 3 compostos aos 40 e aos 90 dias de compostagem (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto).

Trat	Dias	Porcentagem da amostra passante (%)			
		4 mm	3,35 mm	1 mm	0,3 mm
T1	40	71	66	40	12
T1	90	81	75	45	14
T2	40	87	85	23	4
T2	90	95	93	28	2
T3	40	36	34	20	9
T3	90	66	60	33	14

T1=BC+LE, T2=CA+LE, T3=CE+LE.

Fazendo um comparativo entre as duas Tabelas pode-se concluir que nenhum dos 3 compostos gerados ao final dos 90 dias atende as especificações da IN nº25/2009 (MAPA), dessa forma, os compostos seriam classificados como “produto sem especificação granulométrica”.

A granulometria dos fertilizantes refere-se ao tamanho de suas partículas, de forma que, quanto menor a partícula, maior será a superfície de exposição do produto no local onde será aplicado e, conseqüentemente, a velocidade de dissolução e a absorção da umidade, entre outros fatores que podem ser intensificados ou reduzidos em função da granulometria do fertilizante. Além disso, é importante que haja uniformidade entre o tamanho das partículas, para que não haja segregação e desuniformidade na aplicação (ALCARDE et al., 1998).

Tabela 24 - Especificação granulométrica estabelecida para fertilizantes orgânicos e biofertilizantes pela IN no 25/2009 (MAPA).

Natureza Física	Especificação granulométrica		
	Peneira	Passante	Retido
Granulado	4 mm (ABNT nº 5) 1 mm (ABNT nº 18)	95% mínimo 5% máximo	5% máximo 95% mínimo
Pó	2 mm (ABNT nº 10) 0,84 mm (ABNT nº 20) 0,3 mm (ABNT nº 50)	100% 70% 50% mínimo	0% 30 % 50 % máximo
Farelado	3,36 mm (ABNT nº 6) 0,5 mm (ABNT nº 35)	95% mínimo 25% máximo	5% máximo 75% mínimo
Farelado grosso	4,8 mm (ABNT nº 4) 1 mm (ABNT nº 18)	100% 20% máximo	0% 80% mínimo

Adaptado de MAPA, 2009.

O produto final gerado pela casca de eucalipto + lodo de esgoto foi o material mais heterogêneo dentre as misturas estudadas, apresentando quase 40% de partículas retidas em peneiras de 4 mm. Conforme a Resolução nº 481/2017 (CONAMA), o composto deverá ser peneirado com malha de abertura máxima de 40 mm (com exceção do composto destinado à fabricação de substratos para plantas, condicionadores de solo e como matéria-prima para fabricação de fertilizantes organominerais). Dessa forma, o composto gerado pela casca de eucalipto + lodo de esgoto deve ser peneirado ao final do processo e as partículas retidas podem ser reaproveitadas em um novo processo de compostagem. O material peneirado será um produto homogêneo e com partículas menores, que facilitará a aplicação no campo.

#### 4.2.19 Teste de germinação

Os resultados dos testes de germinação para sementes de rúcula (*Eruca sativa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), milho (*Pennisetum glaucum*) e crotalária (*Crotalaria spectabilis*) são apresentados na Figura 7.

Os testes de germinação foram realizados com o intuito de avaliar a época em que o composto estava bioestabilizado, não oferecendo risco à germinação das sementes devido a presença de elementos fitotóxicos. Para tanto, foram escolhidas culturas de diferentes famílias.

Foi possível constatar que o composto não oferece risco à germinação das espécies estudadas. A rúcula e o nabo forrageiro são culturas pertencentes a família Brassicaceae, sendo verificado nas Figuras 7A e 7B, que a germinação dessas espécies foi semelhante. Para os tratamentos bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e casca de arroz + lodo de esgoto (T2) não houve aumento da porcentagem de germinação por volta dos 50 dias de compostagem, enquanto para o tratamento casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3) não houve aumento na porcentagem de germinação por volta dos 60 dias de compostagem.

O milho é da família Poaceae (Gramineae) e foi nessa cultura que foram observados os resultados mais diferentes em relação as outras culturas para o teste de germinação. Observando a Figura 7C, pode-se notar no tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) não houve aumento na porcentagem de germinação próximo aos 80 dias de compostagem. Para o tratamento casca de arroz + lodo de esgoto (T2), não houve aumento na porcentagem de germinação próximo dos 50 dias e para o tratamento casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3), por volta dos 60 dias de compostagem.

A crotalária é uma cultura da família Leguminosae, sendo observado na Figura 7D que não houve aumento na porcentagem de germinação dos 3 tratamentos entre os 50 e 60 dias de compostagem.

Zucconi et al. (1981) relataram que durante a formação da matéria orgânica nos processos de compostagem há ação de ácidos que impedem o processo de germinação. Em estudo da germinação de mastruço (*Lepidium sativum*), uma espécie de agrião da família Brassicaceae, em extrato de diferentes compostos de lodo de esgoto em diferentes épocas de coleta, os autores observaram que, as sementes não germinaram bem durante as 3-4 semanas iniciais da compostagem, depois disso, os índices de germinação aumentaram até atingirem níveis próximos aos do controle, aproximadamente aos 2 meses de compostagem.

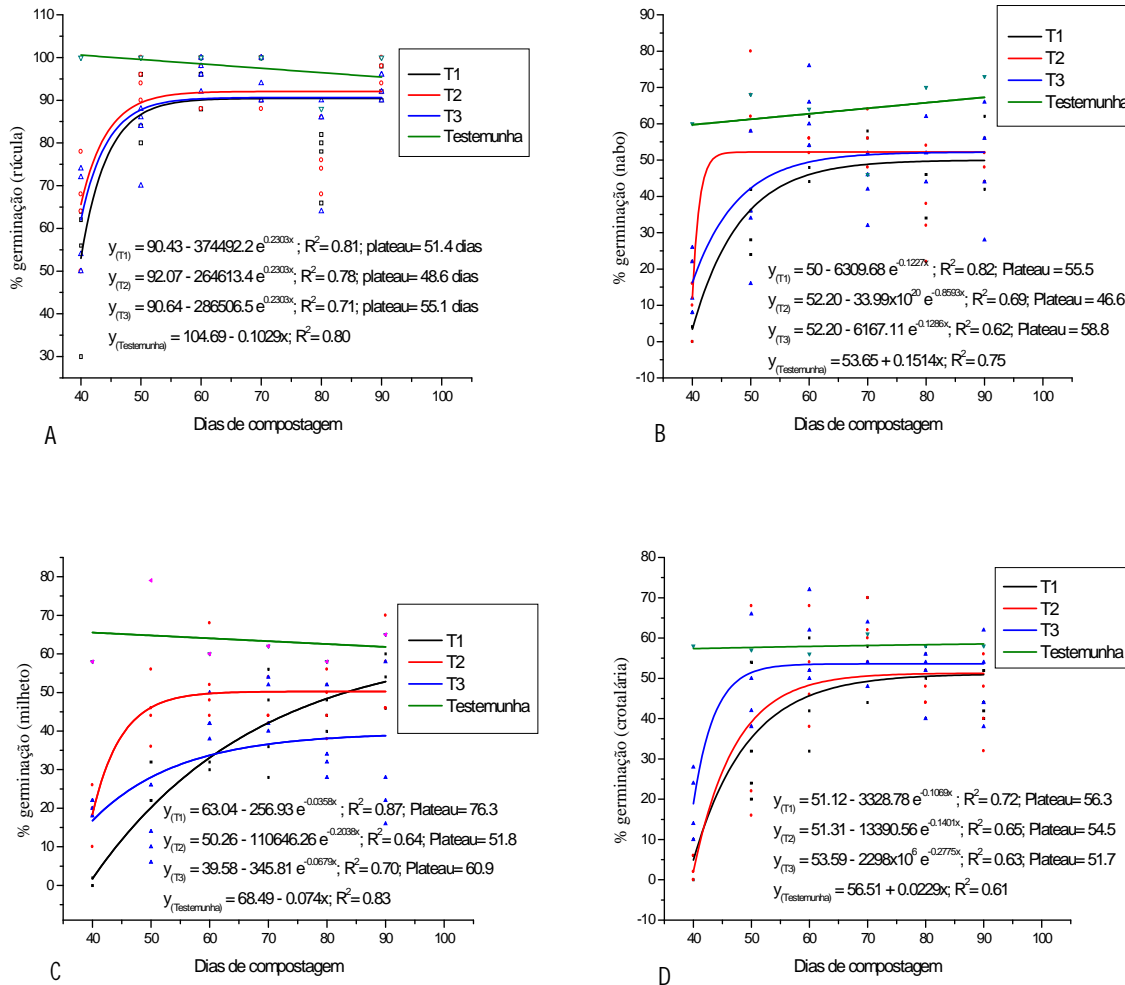
Embora o presente trabalho não apresente os testes de germinação no período inicial da compostagem, pode-se observar que os resultados obtidos corroboram os de Zucconi et al. (1981), uma vez que para as brassicaceas estudadas, não houve

aumento na porcentagem de germinação entre os 50 e 60 dias de compostagem para os 3 tratamentos estudados. Embora o período em que não ocorre aumento na porcentagem de germinação da gramínea estudada (milheto) tenha ocorrido de maneira diferente para os 3 tratamentos, para as leguminosas este período ocorreu de maneira semelhante para os 3 tratamentos estudados. A diferença no período de germinação do milheto se deve ao fato de as gramíneas serem supostamente mais sensíveis a salinidade, o que pode ter retardado a germinação da cultura.

Araújo et al. (2001) realizaram estudo de germinação de sementes de soja e trigo em extratos aquosos de lodo têxtil sem compostar e de lodo têxtil compostado por 90 dias. Os autores relataram que houve incremento da germinação das sementes de soja e trigo nos extratos de lodo têxtil compostado aos 90 dias em relação ao lodo têxtil sem compostar. Entretanto, houve redução severa na germinação das duas culturas nos extratos de lodo têxtil. Os autores ressaltaram que os processos de compostagem podem reduzir severamente as toxinas presentes no material que impedem a germinação de sementes, entretanto estudos mais aprofundados na área se fazem necessários.

Os resultados obtidos corroboram parcialmente os encontrados por Araújo et al. (2001), uma vez que a germinação das sementes ocorreu no composto após o período em que as elementos fitotóxicos ainda estavam presentes no mesmo, entretanto, não houve aumento da porcentagem de germinação devido ao uso do composto com relação a testemunha.

Figura 7 - Teste de germinação de rúcula (A), nabo forrageiro (B), milho (C) e crotalária (D) nos três tratamentos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem)



T1=BC+LE, T2=CA+LE, T3=CE+LE.

#### 4.2.20 Caracterização e quantificação de fungos

Os resultados das unidades formadoras de colônias (UFCs) são apresentados na Tabela 25. Houve diferença entre as épocas de coletas, entre os tratamentos e interação dos fatores. O tratamento casca de arroz + lodo de esgoto (T2) apresentou maior número médio de UFCs e o tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) apresentou o menor número de UFCs.

Quanto às épocas de coleta, aos 50 dias de compostagem houve maior número médio de UFCs em relação aos 40 dias de compostagem para todos os tratamentos. A contagem de colônias realizada aos 50 dias de compostagem no



composto com casca de arroz + lodo de esgoto (T2) foi a que teve maior número de UFCs em todas as coletas dentre os 3 compostos estudados. Isso pode ser explicado pelo fato de o composto de casca de arroz + lodo de esgoto não ter atingido temperaturas elevadas o suficiente para eliminação dos fungos. A casca de arroz se mostrou um material hidrofóbico fazendo com que o processo de compostagem não fosse bem sucedido para esse material, o que provavelmente ajudou a manter a colonização dos fungos.

Tabela 25 - Unidades formadoras de colônias (UFCs em 5 gramas de composto) fúngicas nos 3 compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem).

Épocas de coleta	Tratamentos			Média
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE	
	UFCs em 5 gramas de composto			
40	5 aA	10 cA	20 bA	12 b
50	2 aB	225 aA	17 bB	81 a
60	8 aA	13 cA	7 bA	9 b
70	8 aB	70 bA	11 bB	30 b
80	11 aB	7 cB	53 bA	24 b
90	1 aB	3 cB	105 aA	37 b
Média	6 C	55 A	36 B	
CV	48,87			
	Probabilidade dos valores de F			
T	<0,0001			
E	<0,0001			
T x E	<0,0001			

Letras iguais minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Nas UFCs encontradas foram identificados 9 gêneros de fungos, além de actinobactérias. Os gêneros de fungos encontrados em cada composto e em cada coleta são apresentadas na Figura 9.

Na Figura 8 observa-se a porcentagem de cada gênero de fungo encontrado em cada composto. Nota-se que não houve ocorrência de fungos do gênero *Verticilium* sp. e *Gliocladium* sp., e houve maior porcentagem de actinobactérias no tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) em relação aos tratamentos casca de arroz + lodo de esgoto (T2) e casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3). Além disso, observou-se a ocorrência do fungo do gênero *Blastomyces* sp. somente no tratamento bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1).

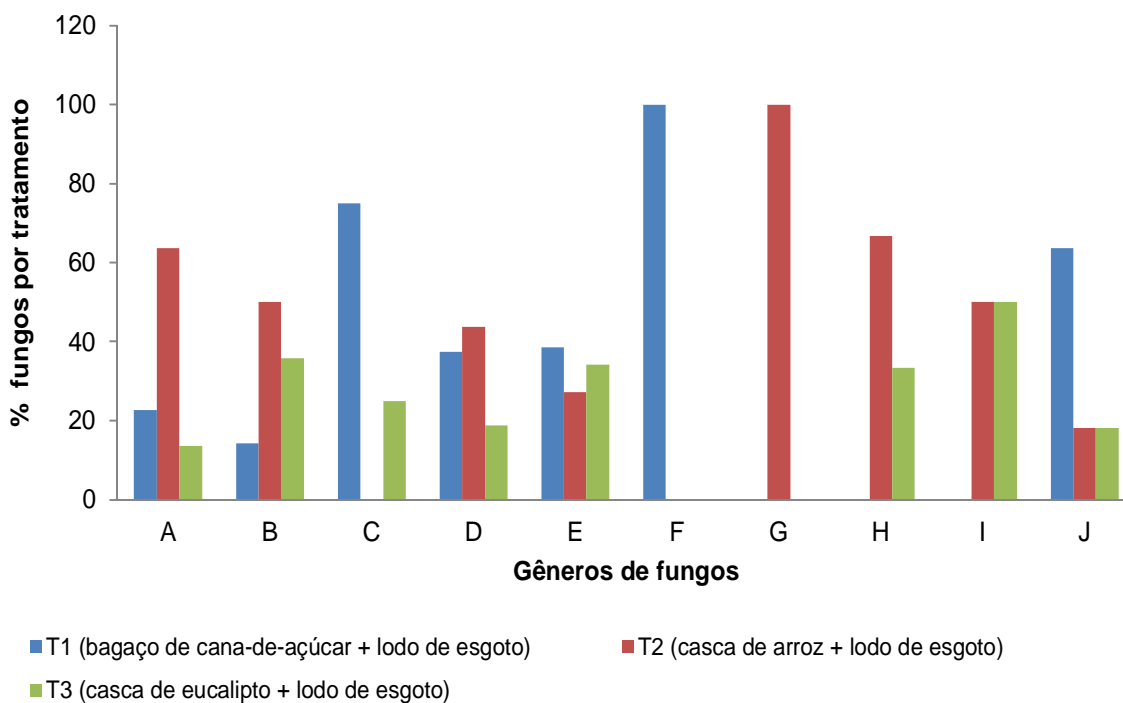
Diversas espécies de fungos do gênero *Verticilium* sp. podem causar doenças vasculares e podridão radicular em diversas culturas (GARRIDO et al., 2003), entretanto alguns estudos mostram que outras espécies de fungos do mesmo

gênero podem ser usados no controle biológico de pragas como mosca branca e broca dos cafezais (GAMA et al., 2005; LOURENÇÃO et al., 2001).

Fungos pertencentes ao gênero *Gliocladium* sp. são usados na agricultura visando o controle biológico de fungos fitopatogênicos (SANTOS e VARAVALLO, 2001), pois têm ação inibitória de fungos causadores do mofo cinzento do tomateiro (*Botrytis cinerea*) (LISBOA et al., 2007) e, além disso, são parasitas de ovos do nematóide de galha da soja (*Heterodera glycines*) (SILVA et al., 1994)

As actinobactérias estão distribuídas na natureza e são um grupo distinto de bactérias importante na população microbiana do solo, pois produzem metabólitos secundários como antibióticos e enzimas extracelulares que participam da mineralização de nutrientes e de processos de decomposição de moléculas orgânicas e substâncias húmicas presentes no solo (SILVA et al., 2015).

Figura 8 - Porcentagem de cada gênero de fungo encontrado em cada tratamento.



A = *Trichoderma* sp.; B = *Aspergillus* sp.; C = *Mucor* sp.; D = *Penicillium* sp.; E = *Rhizopus* sp.; F = *Blastomyces* sp.; G = *Cladosporium* sp.; H = *Verticilium* sp.; I = *Gliocladium* sp.; J = actinobactérias.

Figura 9 - Quadro de identificação dos fungos encontrados nos 3 compostos (T1: bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, T2: casca de arroz + lodo de esgoto e T3: casca de eucalipto + lodo de esgoto) em seis épocas de coleta (40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias de compostagem)

Épocas de coleta	Tratamentos		
	T1=BC+LE	T2=CA+LE	T3=CE+LE
40	<i>Penicillium</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.; actinobactérias.	<i>Trichoderma</i> sp.; <i>Penicillium</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.; <i>Cladosporium</i> sp.	<i>Aspergillus</i> sp.; <i>Mucor</i> sp.; <i>Penicillium</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp. actinobactérias.
50	<i>Trichoderma</i> sp.; <i>Aspergillus</i> sp.; <i>Mucor</i> sp.; <i>Penicillium</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.; actinobactérias.	<i>Trichoderma</i> sp.; <i>Aspergillus</i> sp.; <i>Penicillium</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.	<i>Trichoderma</i> sp.; <i>Aspergillus</i> sp.; <i>Penicillium</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.; actinobactérias.
60	<i>Mucor</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.	<i>Trichoderma</i> sp.; <i>Penicillium</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.; <i>Cladosporium</i> sp.; <i>Verticilium</i> sp.	<i>Aspergillus</i> sp.; <i>Penicillium</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.; <i>Gliocladium</i> sp.
70	<i>Aspergillus</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.	<i>Trichoderma</i> sp.; <i>Aspergillus</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp. actinobactérias.	<i>Trichoderma</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.; <i>Verticilium</i> sp.
80	<i>Trichoderma</i> sp.; <i>Penicillium</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.; actinobactérias.	<i>Trichoderma</i> sp.; <i>Aspergillus</i> sp.; <i>Penicillium</i> sp. actinobactérias.	<i>Trichoderma</i> sp.; <i>Aspergillus</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.
90	<i>Penicillium</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.; <i>Blastomyces</i> sp.	<i>Trichoderma</i> sp.; <i>Aspergillus</i> sp.; <i>Penicillium</i> sp.; <i>Rhizopus</i> sp.; <i>Verticilium</i> sp.; <i>Gliocladium</i> sp.	<i>Rhizopus</i> sp.

A presença de algumas colônias de fungos do gênero *Blastomyces* sp., é um pouco preocupante, pois algumas espécies desse fungo podem causar doenças respiratórias em cães, gatos e seres humanos e, em alguns casos, pode haver doenças oculares em animais domésticos quando há inalação do conídio do fungo (ALEIXO e ABREU, 2015; PONTES et al., 2006; FERREIRA et al., 2007)

Não houve ocorrência de fungos do gênero *Mucor* sp. no composto casca de arroz + lodo de esgoto (T2), entretanto, todas as ocorrências de fungos do gênero *Cladosporium* sp. foram observadas nesse composto.

Fungos do gênero *Cladosporium* sp. são tidos como potencialmente fitopatogênicos e contaminantes de sementes, podendo prejudicar a germinação das

culturas agrícolas e florestais. Além disso, podem ser transmitidos via sementes, podendo levar a redução da população de plantas (LAZAROTTO et al., 2012; MACIEL et al., 2012; MACIEL et al., 2014; PIVETA et al., 2014).

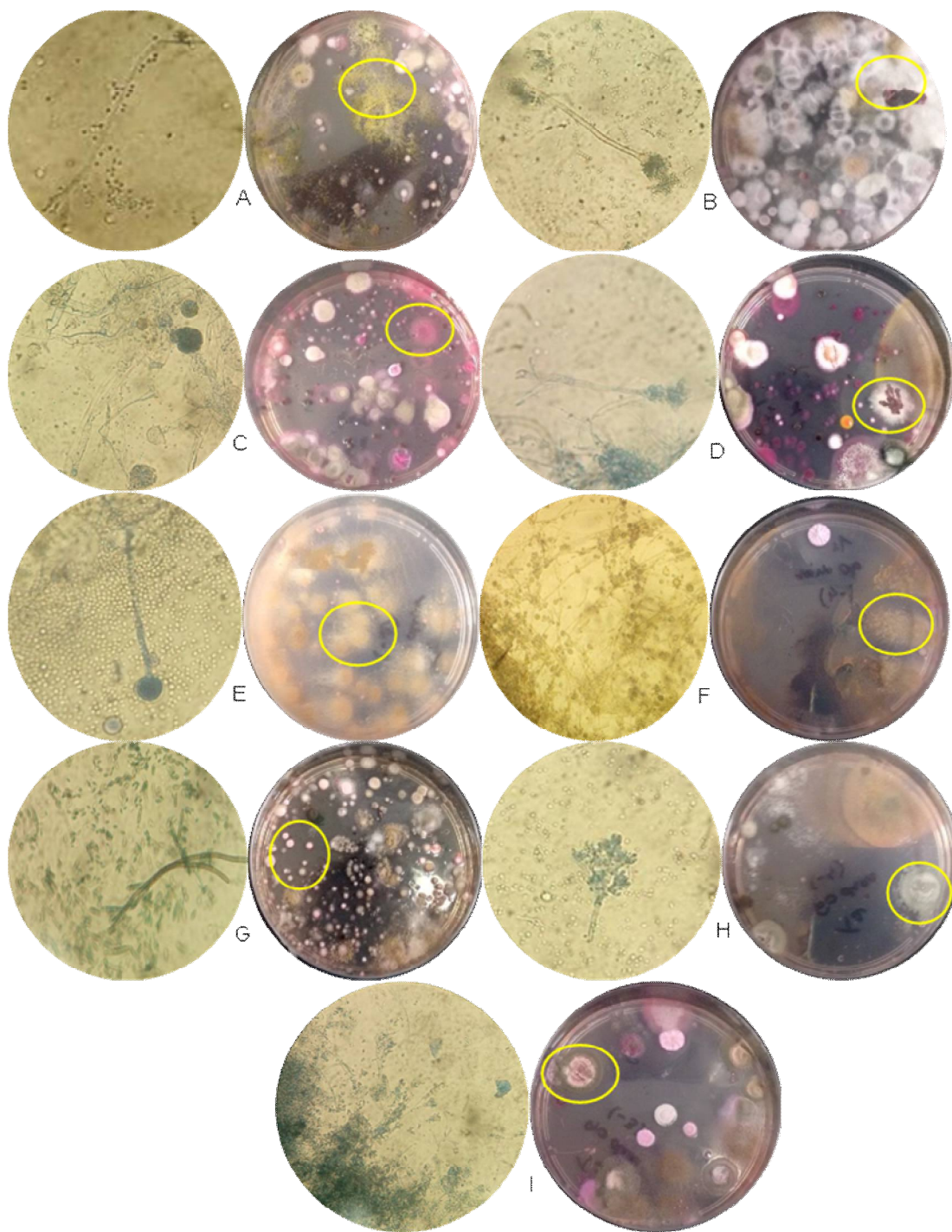
Embora a maioria dos gêneros fúngicos encontrados nos 3 compostos sejam usadas no controle biológico de pragas e doenças presentes no solo e rizosfera, ou como organismos produtores de enzimas que ajudam a degradar a celulose, o amido e a caseína, o que auxilia na formação dos compostos, algumas espécies de fungos dos gêneros *Rhizopus* sp., *Mucor* sp., *Aspergillus* sp. e *Penicillium* sp., podem colonizar grãos e sementes, prejudicando a germinação de espécies vegetais. (TRUFEM, 1998; GRANDI, 1998; ROSSETTO et al., 2003; SILVA et al., 2011).

O gênero fúngico de maior incidência durante todo o período de compostagem nos 3 compostos formados foi o *Trichoderma* sp. Na Tabela 26 pode-se observar que fungos desse gênero aparecem em todas as épocas de coleta do composto casca de arroz + lodo de esgoto (T2), nas coletas realizadas aos 50 e 80 dias de compostagem para o composto de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto (T1) e aos 50, 70 e 80 dias para o composto de casca de eucalipto + lodo de esgoto (T3).

Fungos do gênero *Trichoderma* sp. são saprófitas de solo, muitas espécies de fungos desse gênero agem como parasitas de fungos fitopatogênicos atuando como um bom agente de controle biológico de patógenos do solo e da parte aérea das plantas, tendo como mecanismos de ação a lise celular provocada pela ação de enzimas como protease glucanase e quitinase, indução de resistência e produção de antibióticos (GAVA e MENEZES, 2012; SILVA et al., 2008; EL-HASAN et al., 2006).

Na Figura 10 estão as fotos de todos os fungos encontrados nos compostos, do lado esquerdo a foto tirada do microscópio e do lado direito as fotos tiradas das colônias fúngicas.

Figura 10 - Fotos dos fungos encontrados nos compostos: à esquerda foto tirada do microscópio e à direita foto tirada da colônia fúngica. A = *Trichoderma* sp.; B = *Aspergillus* sp.; C = *Mucor* sp.; D = *Penicillium* sp.; E = *Rhizopus* sp.; F = *Blastomyces* sp.; G = *Cladosporium* sp.; H = *Verticillium* sp.; I = *Gliocladium* sp..



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa trabalhou com as seguintes hipóteses: 1 – a compostagem do bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto, da casca de arroz + lodo de esgoto e da casca de eucalipto + lodo de esgoto terminará em menos de 90 dias, quando as leiras de compostagem atingirem temperaturas próximas às do ambiente; 2 – a elevação da temperatura durante a compostagem será suficiente para eliminar e/ ou diminuir patógenos nocivos à saúde humana nos 3 compostos; 3 – os tratamentos formarão compostos que poderão ser utilizados como fertilizante orgânico, condicionador de solo ou substrato na agricultura, de acordo com os critérios impostos pela legislação vigente; 4 – o uso dos compostos não prejudicará a germinação de sementes de culturas agrícolas; 5 – o composto de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto será compostado em menor tempo, devido ao menor tamanho e maior uniformidade entre as partículas do material.

As hipóteses 1, 2, 3 e 4 foram confirmadas para os compostos de bagaço de cana-de-açúcar + lodo de esgoto e de casca de eucalipto + lodo de esgoto, pois em 90 dias as leiras de compostagem estavam bioestabilizadas e as temperaturas tendiam as do ambiente; durante a compostagem dos materiais, as leiras de compostagem se mantiveram com temperaturas acima de 55°C por mais de 14 dias conforme recomendação da Resolução nº 481/2017 (CONAMA) para higienização dos resíduos sólidos; atendiam os padrões legais para uso agrícola de compostos feitos a partir do lodo de esgoto e estavam bioestabilizados; a partir dos 70 dias de compostagem não houve aumento do número de sementes germinadas nos testes de germinação das 4 culturas testadas (rúcula, nabo forrageiro, milho e crotalária) em função dos tratamentos.

Para o composto de casca de arroz + lodo de esgoto nenhuma das hipóteses foi confirmada, pois a casca de arroz se mostrou hidrofóbica, inviabilizando o processo de compostagem, além disso, foram encontradas colônias de alguns gêneros fúngicos fitopatogênicos ou nocivos à saúde humana no final dos 90 dias de compostagem como *Aspergillus* sp., *Verticillium* sp. e *Cladosporium* sp.

Por fim, a hipótese 5 não se confirmou porque embora as partículas do bagaço de cana-de-açúcar fossem menores, o composto produzido a partir desse material foi bioestabilizado no mesmo período do composto produzido com casca de eucalipto.

Os compostos orgânicos gerados ao final do processo de compostagem resultantes das misturas de lodo de esgoto com bagaço de cana-de-açúcar e com casca de eucalipto apresentaram características que atendem os padrões vigentes na legislação brasileira como relação C/N menor ou igual a 20, pH menor que 6, umidade inferior a 70%, temperatura acima de 55°C por 15 dias, concentração de metais pesados inferior a exigida na legislação. Dessa forma, os dois compostos orgânicos podem ser usados na agricultura.

## **6 CONCLUSÕES**

As misturas de lodo de esgoto com bagaço de cana-de-açúcar e lodo de esgoto com casca de eucalipto proporcionaram a compostagem e a bioestabilização dos compostos no período de 90 dias, sendo verificado ao final do processo temperatura dos materiais próxima a temperatura ambiente, ausência de odor, presença de macronutrientes e micronutrientes disponíveis para as plantas, relação C/N abaixo de 20 e índices favoráveis no teste de germinação.

A mistura de lodo de esgoto e casca de arroz não proporcionou a compostagem e o material não foi bioestabilizado no período de 90 dias.



## REFERÊNCIAS

- ABREU JUNIOR, C. H. et al. Condutividade elétrica, reação do solo e acidez potencial em solos adubados com composto de lixo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 24, n. 3, p. 635-647. 2000.
- ABREU, C. A. et al. Comparação de métodos para avaliar a disponibilidade de metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.3, p.463-465, 1995.
- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES A. S. **Os adubos e a eficiência das adubações**. ANDA, Boletim Técnico 3, São Paulo, 35p.1998.
- ALEIXO, R.; ABREU, C. Micoses endêmicas em doentes sob imunomoduladores. **Revista Portuguesa de Doenças Infecciosas**. Lisboa, v. 11, n. 3, p. 118-128, 2015.
- ANDREOLI, C. V.; et al. Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. In: ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F.; SPERLING, M. (Org.) **Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG**; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.cap.7.
- ARAÚJO, A. S. F.; SAHYOUN, F. K.; MONTEIRO, R. T. R. Evaluation of toxicity of textile sludge compost on seed germination and root elongation of soybean and wheat. **Rev. Ecosystema**, Campina Grande, v.26, n.2, p. 117-119, 2001.
- ARAÚJO, F. F. et al. Desenvolvimento do milho e fertilidade do solo após aplicação de lodo de curtume e fosforita. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Maringa, v.12, n.5, p.507–511, 2008.
- ARAÚJO, F. F.; GIL, F. C.; TIRITAN, C. S. Lodo de Esgoto na fertilidade do solo, na Nutrição de *Brachiaria decumbens* e na atividade da desidrogenase. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 1, p. 1-6, 2009.
- AWASTHI, M.K. et al. Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. **Bioresour. Technol.**, Taiwan, v. 168, no 1, p. 214–221, 2014.
- BARREIRA, L. P.; PHILIPPI JUNIOR. A.; RODRIGUES, M. S. Usinas de compostagem do Estado de São Paulo: qualidade dos compostos e processos de produção. **Eng. sanit. ambient.**, v.11, nº.4, p.385-393, 2006.
- BERNAL, M.P., ALBURQUERQUE, J.A., MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. a review. **Bioresour. Technol.** Taiwan, v. 100, nº 1, p. 5444–5453, 2009.
- BERTOLDI, M.; VALLINI, G.; PERA, A. The biology of composting: a review. **Waste Management & Research**, Áustria, v. 1, n. 2, p. 157-176, 1983.
- BÍBLIA, A. T. Eclesiastes. In: BÍBLIA. Português. **Bíblia Sagrada Ave Maria – Edição Ilustrada**. Tradução da Editora Ave Maria, Paulínea. p. 818, 2016.

BRASIL, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNDA/DNDV/CLV, 2009. 399p.

BRASIL. **Instrução Normativa MAPA nº 25**, de 23 de julho de 2009. Estabelece normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2009.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2006.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 380**, de 31 de outubro de 2006. Retifica o anexo 1 da Resolução CONAMA 375/06. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2006.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 481**, de 3 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. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2017.

BUDZIAK, C. R.; MAIA, C. B. F.; MANGRICH, A. S. Transformações químicas da matéria orgânica durante a compostagem de resíduos da indústria madeireira. **Quim. Nova**, São Paulo, vol. 27, n.3, p. 399-403, 2004.

CARVALHO, C. S. et al. Composição química da matéria orgânica de lodos de esgoto. **Rev. Bras. Ciênc. Agrár.** Recife, v.10, n.3, p.413-419, 2015.

CHIARADIA, J. J. et al. Produtividade e nutrição da mamona cultivada em área de reforma de canal tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, p. 701-709, 2009.

CHUEIRI, W. A. et al. Lodo de esgoto e fertilizante mineral sobre parâmetros do solo e de plantas de trigo. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.5, p.502–508, 2007.

COLLIER, L. S. et al. Efeito do composto de resíduo sólido urbano no teor de metais pesados em solo e goiabeira. **Bragantina**, Campinas, v.63, n.3, p.567-574, 2004.

CONTIN, M.; GOI, D.; DE NOBILI, M. Land application of aerobic sewage sludge does not impair methane oxidation rates of soils. **Science of the total environment**, v. 441, p. 10-18, 2012.

CORRÊA, R. S. et al. Fertilidade química de um substrato tratado com lodo de esgoto e composto de resíduos domésticos. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.5, p.538–544, 2010.

CORRÊA, R. S.; FONSECA, Y. M. F.; CORRÊA, A. S. Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.4, p.420–426, 2007.

CORRÊA, R. S.; WHITE, R. E.; WEATHERLEY, A. J. Effect of compost treatment of sewage sludge on nitrogen behavior in two soils. **Waste Management**, Áustria, v.26, n.6, p.614-619, 2006.

COSTA, G. A.; FERREIRA, A. F.; VAN HAANDEL, A. Monitoramento da atividade bacteriana de um sistema de lodos ativados bardenpho por meio da respirometria. **Eng. sanit. ambient.** Rio de Janeiro, v.12, nº 1, p. 17-23, 2007.

DANCER, W. S.; PETERSON, L. A.; CHESTERS, G. 1973. Ammonification and Nitrification of N as Influenced by Soil pH and Previous N Treatments1. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 37, p. 67-69. 1973.

EL-HASAN, A.; WALKER, F.; BUCHENAUER, H. Trichoderma harzianum and its metabolite 6-pentyl-alpha-pyrone suppress fusaric acid produced by Fusarium moniliforme. **Journal of Phytopathology**, v. 156, n. 02, p. 79-87, 2006.

FERNANDES, F.; SILVA, S.M.C. **Manual prático para compostagem de bio-sólidos**. São Paulo, 84p. 1999.

FERREIRA, R. R. et al. Infecções fúngicas do trato respiratório de cães e gatos. **Acta Scientia Veterinariae**. Rio Grande do Sul, v. 35, n. 2, p. 285-288, 2007.

GALDOS, M. V.; DE MARIA, I. C.; CAMARGO, O. A. Atributos químicos e produção de milho em um Latossolo Vermelho Eutroférrico tratado com lodo de esgoto. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v.28 p. 569-577, 2004.

GAMA, F. C. et al. Influência do ambiente na diversidade de fungos associados a *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (coleoptera, scolytidae) e frutos de *Coffea canephora*. **Arq. Inst. Biol.**, São Paulo, v.72, n.3, p.359-364, 2005.

GARCÍA-GÓMEZ, A. et al. Plant response to the latent phytotoxicity in agroindustrial wastes in different stages of the composting process. In: **Proceedings of the International Conference ORBIT 2001 on Biological Processing of Waste: A Product-oriented Perspective**, Sevilla, Spain, 2001. p. 321-325.

GARRIDO, L. R.; SÔNEGO, O. R.; GOMES, V. N. Fungos associados com o declínio e morte de videiras no Estado do Rio Grande do Sul. **Fitopatol. bras.** Brasília, v. 29, n.3, p. 322-324, 2004.

GAVA, C. A. T.; MENEZES, M. E. L. Eficiência de isolados de Trichoderma spp no controle de patógenos desolo em meloeiro amarelo. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v. 43, n. 4, p. 633-640, 2012.

GRANDI, R. A. P. Taxonomia de deuteromicetos In: Boroni, V. L. R. (org.). **Zigomicetos, Basidiomicetos e Deuteromicetos: noções básicas de taxonomia e aplicações biotecnológicas**. São Paulo: Instituto de Botânica, Secretaria de Estado e Meio Ambiente, p.141-165, 1998.

GUO, R. et al. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. **Bioresour. Technol.** v. 112, nº 1, p. 171-178, 2012.

HARMAN, G. E. Overview of mechanisms and uses of *Trichoderma* spp. **Phytopathology**, Alemanha, v. 96, n. 02, p. 190-194, 2006.

HARRIS-PIERCE, R.L.; REDENTE, E.F. & BARBARICK, K.A. Sewage sludge application effects on runoff water quality in a semiarid grassland. **J. Environ. Qual.** Áustria, v. 24, p.112-115, 1995.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes Orgânicos**. São Paulo, Ed. Ceres, 458p. 1985.

LANARV, Laboratório nacional de Referência Vegetal. **Análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes: métodos oficiais**. Brasília: MAPA/SNDA, 1988. 104p.

LAZAROTTO, M. et al. Sanidade, transmissão via semente e patogenicidade de fungos em sementes de *Cedrela fissilis* procedentes da região sul do Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 493-503, 2012.

LISBOA, B.B. et al. Eficiência de *Trichoderma harzianum* e *Gliocladium viride* na redução da incidência de *Botrytis cinerea* em tomateiro cultivado sob ambiente protegido. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.5, 2007.

LONGHURST, R. D.; ROBERTS, A. H. C.; O'CONNOR, M. B. Farm dairy effluent: A review of published data on chemical and physical characteristics in New Zealand. **New Zealand Journal of Agricultural Research**. Nova Zelândia. v. 43, n.1, p. 7-14, 2010.

LORENZ K.; LAL R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils. **Environ Int.** v.35, n. 1, p.1-8, 2009.

LOURENÇÃO, A. L.; MIRANDA, M. A. C.; ALVES, S. B. Ocorrência epizoótica de *Verticillium lecanii* em *Bemisia tabaci* Biótipo B (Hemiptera: Aleyrodidae) no Estado do Maranhão. **Neotropical Entomology**, v.30, n.1, p.183-185, 2001,

MACIEL, C. G. et al. Detecção, transmissão e patogenicidade de fungos em sementes de angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida*). **Summa Phytopathologica**, v.38, n.4, p.323-328, 2012.

MACIEL, V. A. et al. Eficiência de fungicidas no controle de doenças na cultura do crambe. **Enciclopédia biosfera**, v.10, n.18; p. 1451-1463, 2014.

MALAVOLTA, E. ABC da Adubação. 4a edição. São Paulo SP, **Editora Agronomia Ceres**, Piracicaba, 1979. 255 p.

MARTIN, J. P. Use of acid, rose bengal, and estreptomycin in the plate method for estimating soil fungi. **Soil. Sci.**, v. 69, n. 2, p. 215-232, 1950.

MATOS, A. T. et al. Compostagem de alguns resíduos orgânicos, utilizando-se águas residuárias da suinocultura como fonte de nitrogênio. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v.2, n.2, p.199-203, 1998.

MESQUITA, G. R. A. et al. Viabilidade do lodo de esgoto na agricultura. **Persp. Online: exatas & eng**, Campos dos Goytacazes, v.17 n. 07, p. 80 – 87, 2017.

MODESTO, P. T. et al. Alterações em algumas propriedades de um Latossolo degradado com uso de lodo de esgoto e resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, n. 5, 2009, pp. 1489-1498

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

MOREIRA, M. F. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea do feijoeiro comum em função da distribuição e do teor de fósforo no solo**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. 135p. Tese Doutorado.

MORETTI, S. M. L.; BERTONCINI, E. I.; ABREU JUNIOR, C. H. Decomposição de lodo de esgoto e composto de lodo de esgoto em Nitossolo Háplico. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 39, n 1, p.1796-1805, 2015.

NOGUEIRA, T. A. R. et al. Metais pesados e patógenos em milho e feijão caupi consorciados, adubados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.3, p.331–338, 2007.

NORD, E. Qualidade química na compostagem de resíduos urbanos com inoculação biológica. **Revista de Estudos Sociais**, v. 15, nº.30, p.149-174, 2013.

OLIVEIRA, F. C. et al. Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 505-519, 2002.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Compostagem da fração sólida da água residuária de suinocultura. **Eng. Agríc.** v.29, n.3, p.483-491, 2009.

PEDROSA, T. D. et al. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais. **Nativa**, Sinop, v. 01, n. 01, p. 44-48, 2013.

PEREIRA NETO, J.T.; LELIS, M. P. N. Importância da umidade na compostagem: uma contribuição ao estado da arte. In: **20° CONGRESSO da ABES**, Rio de Janeiro. 8p. 1999.

PIVETA, G. et al. Qualidade sanitária e fisiológica de sementes de aroeira-preta (*Lithraea molleoides*) submetidas a métodos de superação de dormência. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 1-9, 2014.

PONTES, K. C. S.; VIANA, J. A.; DUARTE, T. S. Etiopatogenia da uveíte associada a doenças infecciosas em pequenos animais. **Ceres**, Piracicaba, v. 53, n. 310, p. 531-539, 2006.

PRADO, A. K; CUNHA, M. E. T. Efeito da Aplicação de Lodo de Esgoto e Curtume nas Características Físico-Químicas do Solo e na Absorção de Nitrogênio por Feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **UNOPAR Cient. Exatas Technol.**, Londrina, v. 10, n. 1, p. 37-41, Nov. 2011.

RIBEIRINHO, V. S. et al. Fertilidade do solo, estado nutricional, e produtividade de girassol, em função da aplicação de lodo de esgoto. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 166-173, abr./jun. 2012.

RODRIGUES, A. C. et al. Avaliação do processo de compostagem utilizando lodo de estação de tratamento de efluentes de laticínio. **Ciência e Natura** v.38, n.2, p. 610-619, 2016a.

RODRIGUES, L. A. et al. Qualidade de mudas de *Moringa oleifera* Lam. cultivadas em substratos com fibra de coco verde e compostos orgânicos. **Rev. Ceres**, Piracicaba, v. 63, n.4, p. 545-552, 2016b.

ROSSETTO, C. A. V.; VIEGAS, E. C.; LIMA, T. M. Contaminação fúngica do amendoim em função das doses de calcário e épocas de amostragem. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.3, p.437-445, 2003.

SANES, F. S. M. et al. Compostagem e fermentação de resíduos de pescado para produção de fertilizantes orgânicos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 3, p. 1241-1252, 2015.

SANTOS, D. S. et al. Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbio de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário. **Eng. Sanit. Ambient.** Campina Grande, v.22, n.2, p. 341-349, 2017.

SANTOS, T. T.; VARAVALLO, M. A. Aplicação de microrganismos endofíticos na agricultura e na produção de substâncias de interesse econômico. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, v. 32, n. 2, p. 199-212, 2011.

SILVA, D. C. V. et al. Isolamento e seleção de fungos filamentosos do solo de sistemas agroflorestais do Município de Bom Jardim (PE) com base na capacidade de produção de enzimas hidrolíticas. **Revista Brasileira de Botânica**, v.34, n.4, p.607-610, 2011.

SILVA, E. T. Tratamento de lixo domiciliar e sua aplicação na recuperação de áreas degradadas. **Rev. Acad.**, v. 5, n. 2, p. 197-209, 2007.

SILVA, H. P. et al. Qualidade física de sementes de girassol produzido sob doses de lodo de esgoto. **Revista Verde**, Mossoró, v. 5, n. 1, p. 1-6, 2010.

SILVA, J. F. V.; PIZA, S. M. T.; CARNEIRO, R. G. Fungos associados a ovos de *Hererodera glycines* no Brasil. **Nematol. Brasileira**, v. 18, p. 73-78, 1994.

SILVA, V. M. A.; MARTINS, C. M.; MARTINS, S. C. S. Atividade celulolítica de actinobactérias de região semiárida do Ceará. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.11 n.21; p. 2026 – 2036, 2015.

SIMONETE, M. A. et al. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1187-1195, out. 2003.

SOARES, F.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; MAZUR, N. Influência de diferentes manejos agrícolas na distribuição de metais pesados no solo e em plantas de tomate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.2, p.535-542, 2002.

STEVENSON, F.J. **Cycles of soil, carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrientes**. New York, John Wiley, 1986. 380p.

SULLIVAN D. M. et al. Food waste effects on fertilizer nitrogen efficiency, available nitrogen, and tall fescue yield. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v.66, n. 1, p. 154-161. 2002.

TEIXEIRA, D. L.; MATOS, A. T.; MELO, E. C. Alterações nas características físicas do material orgânico submetido ao processo de compostagem. **Engenharia na agricultura**.v.24,n.1, 2016.

TOMÉ JR. J. B. **Manual para Interpretação de Análise de Solo**. Livraria e Editora Agropecuária. Guaíba, 247p, 1997.

TRUFEM, S. F. B. Taxonomia de zigomicetos In: Boroni, V. L. R. (org.). Zigomicetos, Basidiomicetos e Deuteromicetos: noções básicas de taxonomia e aplicações biotecnológicas. São Paulo: Instituto de Botânica, **Secretaria de Estado e Meio Ambiente**, p. 19-50, 1998.

TSUTIYA, M.T. Alternativas de disposição final de biossólidos. In: TSUTIYA, M.T.et al. eds. **Biossólidos na agricultura**. São Paulo, SABESP, 2001. 468p.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. SW-846 **Test method 3051A: microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils**.2007. Disponível em: <<https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-3051a-microwave-assisted-acid-digestion-sediments-sludges-soils-and-oils>>. Acesso em: Out. 2017.

VACA, R. et al. Effects of sewage sludge and sewage sludge compost amendment on soil properties and *Zea mays* L. plants (heavy metals, quality and productivity). **Rev. Int. Contam. Ambie**.v. 27, n. 4, p. 303-311, 2011.

VALSECCHI, G.; GIGLIOTI, C.; FARINI, A. Microbial biomass, activity, and organic matter accumulation in soils contaminated with heavy metals. **Biology and Fertility of soils**, v.20, p.253-259, 1995.

VAZ, L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Uso de biossólidos em povoamento de eucalipto: efeito em atributos químicos do solo, no crescimento e na absorção de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 747-758, 2002.

VERAS, L. R. V.; POVINELLI, J. A vermicompostagem do lodo de lagoas de tratamento de efluentes industriais consorciada com composto de lixo urbano. **Eng. sanit. ambient**.v. 9, n. 3, p. 218-224, 2004.

WAGNER, A.O. et al. Survival of selected pathogens in diluted sludge of a thermophilic waste treatment plant and in NaCl-solution under aerobic and anaerobic conditions. **Waste Management**, Taiwan, v. 29, n. 1, p. 425-429, 2009.

WILSON, S.C.; DUARTE-DAVIDSON, R.; JONES, K.C. Screening the environment fate of organic contaminants in sewage sludges applied to agricultural soil: 1. The potential for downward movement to ground waters. **Sci. Total Environ.**,v. 185 p. 45-57, 1996.

YAÑEZ, R.; ALONSO, J.L.; DÍAZ, M.J. Influence of bulking agent on sewage sludge composting process. **Bioresour. Technol.** v.100, n. 1, p. 5827–5833, 2009.

ZUCCONI, F., BERTOLDI, M. Compost specifications for the production and characterization of compost from municipal solid waste. In: Bertoldi, M., Ferranti, M.P., L'Hermite, P., Zucconi, F. (Eds.), **Compost: Production, Quality and Use.** Elsevier, Barking, 1987. p. 30–50.

ZUCCONI, F.M. et al. Evaluating toxicity of immature compost. **BioCycle**, v.22, p.54-57, 1981.



**APÊNDICE A** - Parâmetros agrônômicos vigentes na legislação brasileira para uso de fertilizantes orgânicos, condicionadores de solo e substratos produzidos a partir do lodo de esgoto

Parâmetros agrônômicos	Referência	Fertilizantes orgânicos	Condicionadores de solo	Substratos
Umidade máxima (%)	IN MAPA nº 25 (2009) e IN MAPA nº 05 (2016)	70	70	CD
N total mínimo (%)	IN MAPA nº 25 (2009)	0,5	0,5	
C orgânico mínimo (%)	IN MAPA nº 25 (2009)	15	15	
CTC mínima (mmol <sub>c</sub> /kg)	IN MAPA nº 25 (2009), IN MAPA nº 35 (2006) e IN MAPA nº 05 (2016)	Conforme declarado (CD)	200	CD
pH mínimo	IN MAPA nº 25 (2009)	6	6	
C/N máxima	IN MAPA nº 25 (2009)	20	20	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total (%)				
K <sub>2</sub> O solúvel em água (%)				
CRA mínima (%)	IN MAPA nº 35 (2006)		60	
CTC/C	IN MAPA nº 25 (2009)	CD	CD	
Outros nutrientes (%)	IN MAPA nº 25 (2009)	CD	CD	
CE máxima (mS cm <sup>-1</sup> )	IN MAPA nº 05 (2016)			CD
Densidade (kg m <sup>-3</sup> , em base seca)	IN MAPA nº 05 (2016)			CD
pH em água	IN MAPA nº 05 (2016)			CD
CRA (%)	IN MAPA nº 05 (2016)			CD



**APÊNDICE B** - Limites máximos de patógenos vigentes na legislação brasileira para uso de fertilizantes orgânicos, condicionadores de solo e substratos produzidos a partir do lodo de esgoto

Limites máximos de patógenos	Referência	Fertilizante orgânico composto e condicionador de solo Classe D	Substrato
Coliformes termotolerantes (NMP/g de MS)	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	≤ 1000	≤ 1000
Ovos viáveis de helmintos (nº em 4 g de ST)	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	≤ 1	≤ 1
<i>Salmonella</i> spp.	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	Ausência em 10 g de MS	Ausência em 10 g de MS



**APÊNDICE C** - Limites máximos de contaminantes vigentes na legislação brasileira para uso de fertilizantes orgânicos, condicionadores de solo e substratos produzidos a partir do lodo de esgoto

Limites máximos de contaminantes	Referência	Fertilizante orgânico composto e condicionador de solo Classe D	Substrato
Arsênio (mg/Kg)	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	20	20
Cádmio (mg/Kg)	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	3	8
Chumbo (mg/Kg)	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	150	300
Cromo hexavalente (mg/Kg)	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	2	
Cromo (mg/kg)	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)		500
Mercúrio (mg/Kg)	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	1	2,5
Níquel (mg/Kg)	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	70	175
Selênio (mg/Kg)	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	80	80



**APÊNDICE D** - Limites máximos de materiais inertes vigentes na legislação brasileira para uso de fertilizantes orgânicos, condicionadores de solo e substratos produzidos a partir do lodo de esgoto

Limites máximos de materiais inertes	Referência	Fertilizante orgânico composto e condicionador de solo Classe D	Substrato
Vidros, plásticos, metais > 2 mm	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	≤ 0,5% na MS	
Pedras > 5 mm	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)	≤ 5% na MS	
Sementes ou qualquer material de propagação de ervas daninhas	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)		≤ 0,5 planta por litro, avaliado em teste de Germinação
As espécies fitopatogênicas dos Fungos do gênero <i>Fusarium</i> , <i>Phytophthora</i> , <i>Pythium</i> , <i>Rhizoctonia</i> e <i>Sclerotinia</i>	IN 27 (2006) e IN MAPA nº 07 (2016)		Ausência