

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**ACELERAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM DE LODOS  
GERADOS EM REATORES UASB COM INÓCULO COMERCIAL**

**WELLITON LEANDRO DE OLIVEIRA BOINA**

São Carlos

2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**ACELERAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM DE LODOS  
GERADOS EM REATORES UASB COM INÓCULO COMERCIAL**

**WELLITON LEANDRO DE OLIVEIRA BOINA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. João Sérgio Cordeiro

São Carlos

2018

Boina, Welliton Leandro de Oliveira

Aceleração do Processo de Compostagem de Lodos Gerados em Reatores UASB com Inóculo Comercial / Welliton Leandro de Oliveira Boina. -- 2018.

109 f. : 30 cm.

Tese (doutorado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador: João Sergio Cordeiro

Banca examinadora: Cali Laguna Achon, Jorge Akutsu, Denis Miguel Roston, Marcelo Zaiat

Bibliografia

1. Lodo de Esgoto Sanitário. 2. Compostagem. 3. Inóculo Comercial. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Ronildo Santos Prado – CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

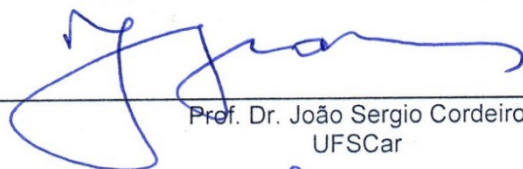
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

---

Folha de Aprovação

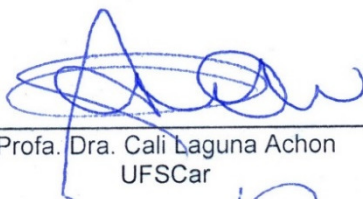
---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado do candidato Welliton Leandro de Oliveira Boina, realizada em 06/08/2018:



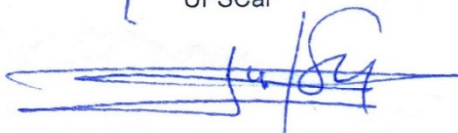
---

Prof. Dr. João Sergio Cordeiro  
UFSCar



---

Profa. Dra. Cali Laguna Achon  
UFSCar



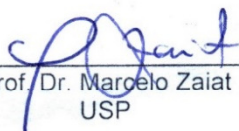
---

Prof. Dr. Jorge Akutsu  
UFSCar



---

Prof. Dr. Denis Miguel Roston  
UNICAMP



---

Prof. Dr. Marcelo Zaiat  
USP

*Dedico este trabalho a minha esposa Rosane e ao meu  
filho Enzo*

## *Agradecimentos*

---

*Agradeço primeiro a Deus por permitir a conclusão de mais uma etapa da minha vida. Toda minha gratidão pela constante presença em minha vida, por me fortalecer diante as dificuldades, pela sabedoria, saúde, paciência e as bênçãos recebidas.*

*Aos meus familiares pelo apoio infindável, compreensão, carinho e amor.*

*A minha esposa Rosane, pelo amor, carinho, companheirismo, incentivo, compreensão, ajuda, paciência, apoio e críticas que muito me ajudaram em todos os momentos e ao meu filho Enzo, fonte de alegria e amor.*

*Ao grande amigo Paulo Augusto Raymundo Pereira pelo apoio e acolhida em São Carlos-SP.*

*Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. João Sergio Cordeiro, pela oportunidade, confiança, orientação, apoio e ajuda em todos os momentos.*

*A Profa. Dra. Cali Laguna Achon do Departamento de Engenharia Civil (DECiv) da UFSCar, Câmpus de São Carlos-SP, pelas orientações, troca de experiencias e apoio.*

*Ao Prof. Dr. João Eduardo Machado Perea Martins da Faculdade de Ciências (FC/UNESP), Câmpus de Bauru-SP, pela atenção, disponibilidade, interesse no desenvolvimento e permissão de uso do sensor de amostragem de temperaturas.*

*Ao Prof. Dr. Edilson Ferreira Flores, da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT/UNESP), Câmpus de Presidente Prudente-SP, pela flexibilidade na mudança dos meus horários de trabalho, incentivo, conselhos e apoio na continuidade dos meus estudos.*

*Ao Prof. Dr. Roberto Lyra Villas-Boas da Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA/UNESP), Câmpus de Botucatu-SP, pelo apoio, incentivo, orientação e viabilidade do desenvolvimento deste estudo junto ao Projeto de Compostagem sob sua coordenação.*

*A todos os funcionários e pós-graduandos envolvidos no grupo de pesquisa do Projeto de Compostagem (Sabesp/Fapesp/Unesp) da FCA/UNESP, que direta e indiretamente contribuíram de alguma forma para que este trabalho fosse realizado e concluído. Em especial ao Eng. Agrônomo Antônio Ribeiro da Cunha e a Pós-Doutoranda Eng. Agrônoma Caroline de Moura D' André Mateus.*

*A SABESP - Companhia de Saneamento do Estado de São Paulo, pelas informações cedidas e pelo espaço de trabalho na ETE-Lageado em Botucatu, SP. Em especial a Gerente de Divisão (Divisão de Controle Sanitário do Médio Tietê – RMOC) Eng. Ana Lúcia Silva e ao Técnico em Sistemas de Saneamento Eduardo André Fregona pelas informações em relação a ETE-Lageado.*

*Aos meus amigo(a)s do Programa do Pós-Graduação em Engenharia Urbana pelos momentos aos quais passamos juntos.*

*A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro.*

*“O otimista é um tolo.*

*O pessimista, um chato.*

*Bom mesmo é ser um realista esperançoso”.*

*Ariano Suassuna*

O Brasil ainda enfrenta problemas gravíssimos na atualidade relacionados ao gerenciamento de resíduos sólidos em vários setores. Entre os mais diversos resíduos gerados diariamente, o lodo de esgoto sanitário merece destaque especial devido à sua disposição final problemática e frequentemente negligenciada. A grande preocupação resultante do gerenciamento inadequado deste tipo de resíduo está no fato de ser contaminante, por apresentar microrganismos patogênicos e metais tóxicos, prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. No entanto, como alternativa, comumente entre os tratamentos e disposições finais, o que mais se evidencia é a redução de volume e umidade para disposição em aterro sanitário. Atualmente não há como negar algumas prerrogativas que vão ao encontro a este tipo de possibilidade, como a escassez de áreas aptas à construção de aterros sanitários e as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos regidas pela Lei Nº 12.305/10, regulamentada pelo decreto Nº 7.404/10, de 23 de dezembro de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Desse modo, a biooxidação de lodos de esgoto sanitário por meio do processo de compostagem pode proporcionar a melhora das qualidades físicas, químicas e biológicas do resíduo, além de representar uma alternativa promissora em relação aos compostos químicos condicionadores de solos. Neste sentido, este estudo apresenta resultados do processo de compostagem de lodo de esgoto sanitário gerado em reatores UASB por meio da utilização de inóculo comercial (acelerador de compostagem). O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência do inóculo comercial no processo de compostagem. Durante o processo de compostagem, foram realizadas análises de temperatura, umidade, pH, condutividade elétrica e teores de sólidos (totais, fixos e voláteis), bem como avaliou-se os parâmetros agronômicos dos compostos orgânicos obtidos no processo final de compostagem. Ante o exposto, os resultados das análises efetuadas durante o processo de compostagem não demonstraram melhoras significativas que justifiquem o uso do inóculo comercial quando comparados aos resultados obtidos no processo de compostagem que não utilizou o inóculo comercial. Do mesmo modo, a avaliação das análises efetuadas nos compostos orgânicos obtidos no final dos processos de compostagem (inoculado e convencional), não apresentaram mudanças significativas que justifiquem a utilização do inóculo comercial. Assim, diante os procedimentos em que o estudo foi desenvolvido e considerando o tipo de lodo de esgoto sanitário e o material estruturante utilizados, o emprego de inóculo comercial no processo de compostagem não proporcionou melhoras significativas a ponto de justificar seu uso, sendo os microrganismos nativos presentes no sistema suficientes para o processo de degradação da matéria orgânica.

**Palavras-chave:** compostagem, composto orgânico, inóculo comercial, lodo de esgoto, UASB.



Brazil still faces very serious problems currently related to the management of solid waste in various sectors. Among the most diverse waste generated daily, sewage sludge deserves special mention due to its problematic and often neglected final disposition. The great concern resulting from the inadequate management of this type of waste lies in the fact that it is a contaminant due to the presence of pathogenic microorganisms and toxic metals that are harmful to human health and the environment. However, as an alternative, commonly between treatments and final provisions, what is more evident is the reduction of volume and humidity for disposal in landfills. At present there is no denying certain prerogatives that meet this type of possibility, such as the scarcity of areas suitable for the construction of landfills and the guidelines related to the integrated management and solid waste management governed by Law No. 12,305 / 10, regulated by Decree No. 7.404 / 10, of December 23, 2010, which establishes the National Solid Waste Policy (PNRS). Thus, the biooxidation of sanitary sewage sludge by means of the composting process can improve the physical, chemical and biological qualities of the waste, as well as represent a promising alternative to soil conditioning chemical compounds. In this sense, this study presents results of the composting process of sanitary sewage sludge generated in UASB reactors through the use of commercial inoculum. The objective of this study was to evaluate the efficiency of the commercial inoculum in the composting process. During the composting process, analyzes of temperature, humidity, pH, electrical conductivity and solids contents (total, fixed and volatile) were performed, as well as the agronomic parameters of the organic compounds obtained in the final composting process. In view of the above, the results of the analyzes carried out during the composting process did not show significant improvements that justify the use of the commercial inoculum when compared to the results obtained in the composting process that did not use the commercial inoculum. Likewise, the evaluation of the analyzes performed on the organic compounds obtained at the end of the composting processes (inoculated and conventional), did not present significant changes that justify the use of the commercial inoculum. Thus, in view of the procedures in which the study was developed and considering the type of sanitary sewage sludge and the structural material used, the use of commercial inoculum in the composting process did not provide significant improvements to the point of justifying its use, with the microorganisms being native present in the system sufficient for the degradation process of organic matter.

**Keywords:** commercial inoculum, composting, organic compost, , sewage sludge, UASB.

## *Lista de figuras*

---

Figura 1. Esquema simplificado de compostagem de lodo de esgoto sanitário .....	9
Figura 2. Verificação das temperaturas em função das fases da compostagem durante o processo de degradação da matéria orgânica .....	11
Figura 3. Tipos de microrganismos durante o processo de compostagem e faixas de temperatura.....	11
Figura 4. Seção transversal de uma leira de compostagem (zonas principais e fluxo de convecção).....	13
Figura 5. Produtos para síntese e biodegradação da lignina .....	17
Figura 6. Perfil típico de temperaturas em uma leira de compostagem .....	20
Figura 7. Nucleotídeo de adenosina trifosfato (ATP).....	21
Figura 8. Esquema genérico aplicável à compostagem do lodo pelo sistema de leiras revolvidas.....	27
Figura 9. Equipamento para revolvimento de leiras de compostagem .....	27
Figura 10. Esquema simplificado do sistema de compostagem em leiras estáticas aeradas.....	28
Figura 11. Compostagem por sistema de leiras estáticas aeradas.....	29
Figura 12. Comparação dos sistemas de compostagem em função dos custos e complexidade.....	30
Figura 13. Esquema da montagem da caixa de PEAD com malha de metal .....	50
Figura 14. Projeto preliminar montado para teste de bancada .....	51
Figura 15. Esquema da composição do substrato .....	52
Figura 16. Estação de tratamento de esgoto Monjolinho (ETE-Monjolinho).....	53
Figura 17. Centrifuga da ETE-Monjolinho.....	53
Figura 18. Caçamba de lodo desaguado em centrífuga (ETE-Monjolinho).....	54
Figura 19. Caixa plástica utilizada para armazenamento de lodo de esgoto.....	54
Figura 20. Medidas internas da caixa de PEAD .....	55
Figura 21. Acréscimo de lodo de esgoto ao substrato ADB e formação da pilha de compostagem.....	56
Figura 22. Fluxograma da metodologia da Etapa 2 .....	57
Figura 23. Vista aérea da Estufa de compostagem e ETE Lageado.....	58
Figura 24. Interior da estufa de compostagem.....	59
Figura 25. Sistema de tratamento de esgoto sanitário modificado (ETE-Lageado).....	60
Figura 26. Estufa de desaguamento e secagem de lodo.....	61
Figura 27. Esteira de lodo seco e caçamba de armazenamento .....	61
Figura 28. Estufa de armazenamento de lodo e material estruturante para compostagem.....	62
Figura 29. Lodo de esgoto centrifugado gerado em reatores UASB .....	62

Figura 30. Casca de eucalipto .....	63
Figura 31. Proporção 1:1 de lodo de esgoto gerado em reatores UASB e casca de eucalipto .....	64
Figura 32. Mistura na Proporção 1:1 de lodo e esgoto e casca de eucalipto em caminhão caçamba.....	64
Figura 33. Formação da leira de compostagem com Proporção 1:1 .....	65
Figura 34. Leira de compostagem recém montada .....	65
Figura 35. Trator modificado atrelado a uma compostadeira .....	66
Figura 36. Eixo de revolvimento da compostadeira .....	67
Figura 37. Leira antes e após a passagem do trator modificado atrelado a uma compostadeira.....	67
Figura 38. Processo de aeração e revolvimento da leira de compostagem .....	68
Figura 39. Casca de eucalipto .....	68
Figura 40. Micrologger Campbell Scientific - CR23X.....	70
Figura 41. Termopares para medição de temperatura.....	71
Figura 42. Amostras de composto obtidas nos pontos dos termopares na leira de compostagem .....	72

## *Lista de quadros*

---

Quadro 1. Principais vantagens e desvantagens dos sistemas de compostagem.....	32
Quadro 2. Restrições de uso para fertilizantes orgânicos .....	44

## *Lista de tabelas*

---

Tabela 1. Pesos das caixas com o lodo de esgoto e com o substrato antes do processo de compostagem .....	55
Tabela 2. Volume interno da caixa de PEAD e volume do substrato .....	55
Tabela 3. Pesos das caixas com o lodo de esgoto e com o substrato após o processo de compostagem .....	79
Tabela 4. Comparativo entre os pesos e volumes antes e após o processo de compostagem .....	79
Tabela 5. Teores de sólidos (totais, fixos e voláteis) no lodo de esgoto gerado em reatores UASB antes do processo de compostagem e mistura com material estruturante .....	85
Tabela 6. Teores de sólidos (totais, fixos e voláteis) no composto orgânico gerado após processo de compostagem .....	87
Tabela 7. Teores de macronutrientes primários na amostra de lodo de esgoto gerado em reatores UASB .....	88
Tabela 8. Teores de macronutrientes primários nas amostras de compostos orgânicos gerados no processo de compostagem com e sem utilização de inóculo comercial .....	88
Tabela 9. Teores de macronutrientes secundários e micronutrientes na amostra de lodo de esgoto gerado em reatores UASB e teores mínimos exigíveis de referência .....	89
Tabela 10. Teores de macronutrientes secundários e micronutrientes nas amostras de compostos orgânicos gerados no processo de compostagem com e sem utilização de inóculo comercial e teores mínimos exigíveis de referência.....	89
Tabela 11. Teores de contaminantes inorgânicos na amostra de lodo de esgoto gerado em reatores UASB e teores máximos admissíveis de referência.....	90
Tabela 12. Teores de contaminantes inorgânicos nas amostras de compostos orgânicos gerados no processo de compostagem com e sem utilização de inóculo comercial e teores máximos admissíveis de referência.....	90

## *Lista de gráficos*

---

Gráfico 1. Monitoramento da temperatura no processo de compostagem em escala reduzida do lodo gerado em reatores UASB da ETE-Monjolinho .....	77
Gráfico 2. Comparativo das oscilações de temperatura nas leiras de compostagem .....	80
Gráfico 3. Variação dos teores de umidades nas leiras de compostagem do lodo de esgoto sanitário .....	82
Gráfico 4. Variações do pH nas leiras de compostagem do lodo de esgoto sanitário .....	83
Gráfico 5. Variações de condutividade elétrica nas leiras de compostagem do lodo de esgoto sanitário .....	83
Gráfico 6. Teores de sólidos totais nos substratos durante o processo de compostagem do lodo de esgoto sanitário gerado em reatores UASB .....	85
Gráfico 7. Teores de sólidos fixos nos substratos durante o processo de compostagem do lodo de esgoto sanitário gerado em reatores UASB .....	86
Gráfico 8. Teores de sólidos voláteis nos substratos durante o processo de compostagem do lodo de esgoto sanitário gerado em reatores UASB .....	86

## *Lista de abreviaturas e siglas e abreviaturas*

---

<b>AIA</b>	Avaliação de Impacto Ambiental
<b>ATP</b>	Adenosina Trifosfato
<b>C.E.</b>	Condutividade Elétrica
<b>CRA</b>	Capacidade de Retenção de Água
<b>CTC</b>	Capacidade de Troca Catiônica
<b>CTC/C</b>	Capacidade de Troca Catiônica/Carbono
<b>CETESB</b>	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
<b>CFR</b>	Code of Federal Regulation
<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<b>DAT</b>	Dynamic Address Translation
<b>DBO</b>	Demanda Bioquímica de Oxigênio
<b>DECiv</b>	Departamento de Engenharia Civil
<b>DNA</b>	Ácido desoxirribonucleico
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxigênio
<b>EM</b>	Effective Microorganisms
<b>EPI</b>	Equipamento de Proteção Individual
<b>ETE</b>	Estação de Tratamento de Esgoto
<b>FAPESP</b>	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
<b>FC</b>	Faculdade de Ciências
<b>FCA</b>	Faculdade de Ciências Agrônomicas
<b>FCT</b>	Faculdade de Ciências e Tecnologia
<b>IN SDA</b>	Instrução Normativa da Secretária de Defesa Agropecuária
<b>IS</b>	Índice salino
<b>KMA</b>	Korin Meio Ambiente
<b>MAPA</b>	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>PNMA</b>	Política Nacional de Meio Ambiente
<b>PNRS</b>	Política Nacional de Resíduos Sólidos
<b>RAFAs</b>	Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente

<b>SABESP</b>	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
<b>SISNAMA</b>	Sistema Nacional do Meio Ambiente
<b>UASB</b>	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
<b>UFSCar</b>	Universidade Federal de São Carlos
<b>UNESP</b>	Universidade Estadual Paulista
<b>USEPA</b>	United State Environmental Protection Agency



## *Lista de símbolos*

---

$\pm$	Mais ou menos
$\mu\text{m}$	Micrometro
$\mu\text{S.cm}^{-1}$	Micro-Siemens por centímetro
%	Percentual
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$\text{Al}^{3+}$	Cátion de alumínio
<b>B</b>	Boro
<b>Ca</b>	Cálcio
$\text{Ca}^{2+}$	Cátion de cálcio
<b>C-C</b>	Ligação Carbono-Carbono
$\text{CaCl}_2$	Cloreto de cálcio
<b>Cd</b>	Cádmio
$\text{CH}_4$	Metano
<b>Cl</b>	Cloro
<b>C/N</b>	Carbono/Nitrogênio
<b>Co</b>	Cobalto
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
<b>C.O./N</b>	Carbono Orgânico/Nitrogênio
<b>Cr</b>	Cromo
<b>Cu</b>	Cobre
<b>Fe</b>	Ferro
<b>g</b>	Gramas
<b>G+C</b>	Ligação Guanina+Citosina
<b>h</b>	Hora
$\text{H}^+$	Cátion de hidrogênio (hidrônio)
<b>ha</b>	hectare
$\text{H}_2\text{O}$	Monóxido de diidrogênio ( <i>água</i> )
$\text{H}_2\text{S}$	Ácido sulfídrico
<b>K</b>	Potássio

<b>K<sup>+</sup></b>	Cátion de potássio
<b>kg</b>	Quilograma
<b>K<sub>2</sub>O</b>	Óxido de Potássio
<b>L</b>	Litro
<b>m</b>	Metro
<b>Me<sub>2</sub>S</b>	Dimetil sulfeto (DMS)
<b>Me<sub>2</sub>S<sub>2</sub></b>	Dimetil disulfeto (DMDS)
<b>MeSH</b>	Metanotiol
<b>Mg</b>	Magnésio
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	Cátion de magnésio
<b>mg</b>	Miligrama
<b>mg. Kg<sup>-1</sup></b>	Miligrama por quilo
<b>mmolc kg<sup>-1</sup></b>	Milimol de carga por quilograma
<b>Mn</b>	Manganês
<b>Mo</b>	Molibdênio
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>mol.L<sup>-1</sup></b>	Moléculas por litro
<b>N</b>	Nitrogênio
<b>Na</b>	Sódio
<b>Na<sup>+</sup></b>	Cátion de sódio
<b>NH<sub>3</sub></b>	Amônia
<b>NaNO<sub>3</sub></b>	Nitrato de sódio
<b>Ni</b>	Níquel
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxigênio
<b>P</b>	Fósforo
<b>ppm</b>	Parte por milhão
<b>Pb</b>	Chumbo
<b>pH</b>	Potencial hidrogeniônico
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	Pentóxido de Fósforo
<b>S</b>	Enxofre
<b>ST</b>	Sólidos totais

<b>SF</b>	Sólidos fixos
<b>SV</b>	Sólidos voláteis
<b>UFC.mL<sup>-1</sup></b>	Unidades formadoras de colônias por mililitros
<b>v</b>	volts
<b>Zn</b>	Zinco

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	2
<b>2.1. Objetivo geral</b> .....	2
<b>2.2. Objetivo específico</b> .....	2
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
<b>3.1. Tratamento de esgoto sanitário</b> .....	3
<b>3.2. Geração de lodo de esgoto no Brasil</b> .....	3
<b>3.3. Geração de lodo de esgoto no sistema de tratamento</b> .....	4
3.3.1. Resíduos e rejeitos no sistema de tratamento.....	5
<b>3.4. Tratamento biológico de esgoto sanitário</b> .....	6
3.4.1. Tratamento biológico aeróbio.....	6
3.4.2. Tratamento biológico anaeróbio .....	7
<b>3.5. Compostagem</b> .....	7
<b>3.6. Fases da compostagem</b> .....	11
3.6.1. Fase mesofílica .....	12
3.6.2. Fase termofílica .....	12
3.6.3. Fase de resfriamento (segunda fase mesofílica).....	14
3.6.4. Fase de maturação.....	14
<b>3.7. Microrganismos envolvidos no processo de compostagem</b> .....	14
3.7.1. Bactéria.....	14
3.7.2. Actinobactéria.....	15
3.7.3. Fungos .....	16
<b>3.8. Parâmetros físico-químicos que afetam a compostagem</b> .....	17
3.8.1. Aeração .....	18
3.8.2. Temperatura .....	19
3.8.3. Umidade.....	21
3.8.4. Relação C/N.....	22

3.8.5. Granulometria do material .....	23
3.8.6. pH .....	24
3.8.7. Condutividade elétrica .....	25
<b>3.9. Sistemas de compostagem .....</b>	<b>25</b>
3.9.1. Compostagem por sistema de leiras revolvidas .....	26
3.9.2. Compostagem por sistema de leiras estáticas aeradas .....	28
3.9.3. Compostagem por sistema de reatores biológicos .....	29
3.9.3.1. Reatores de fluxo vertical .....	30
3.9.3.2. Reatores de fluxo horizontal .....	30
3.9.3.3. Reatores de batelada .....	31
3.9.3.4. Vantagens e desvantagens dos sistemas de compostagem.....	31
<b>3.10. Inóculo comercial (acelerador de compostagem) .....</b>	<b>33</b>
<b>3.11. Legislação e aspectos legais .....</b>	<b>34</b>
3.11.1. Política Nacional do Meio Ambiente .....	34
3.11.2. Constituição Federal .....	34
3.11.3. Lei dos Crimes Ambientais.....	35
3.11.4. Política Nacional de Resíduos Sólidos.....	35
3.11.5. Política Estadual de Resíduos Sólidos .....	37
3.11.6. Norma CETESB .....	37
3.11.7. Resoluções CONAMA .....	38
3.11.7.1. Resolução CONAMA 375/06.....	38
3.11.7.2. Resolução CONAMA 481/17 .....	39
3.11.8. Normas NBR .....	40
3.11.9. Instruções Normativas SDA/MAPA.....	41
<b>3.12. Parâmetros agronômicos – fertilizantes/compostos orgânicos.....</b>	<b>44</b>
3.12.1. Macro e Micronutrientes.....	44
3.12.2. Contaminantes inorgânicos.....	45
3.12.3. Carbono orgânico.....	46
3.12.4. Sólidos Totais .....	46

3.12.5. Sólidos Fixos .....	46
3.12.6. Sólidos Voláteis .....	47
3.12.7. Capacidade de Troca Catiônica .....	47
3.12.8. Capacidade de Retenção de Água.....	47
3.12.9. pH em CaCl <sub>2</sub> .....	47
3.12.10. Condutividade elétrica e índice salino .....	48
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1. Considerações iniciais .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2. Considerações gerais do projeto preliminar (primeira etapa).....</b>	<b>49</b>
4.2.1. Montagem do projeto preliminar .....	50
4.2.2. Preparo do substrato para o processo de compostagem .....	51
4.2.3. Coleta do lodo de esgoto sanitário .....	52
4.2.4. Procedimento experimental .....	55
<b>4.3. Considerações gerais do projeto em escala real (segunda etapa) .....</b>	<b>57</b>
4.3.1. Estufa de compostagem .....	58
4.3.2. Sistema de compostagem.....	62
4.3.2.1. Montagem da leira de compostagem .....	62
4.3.2.2. Proporção 1:1 (volume lodo : volume de casca de eucalipto).....	63
4.3.2.3. Aeração.....	67
4.3.2.4. Granulometria.....	68
4.3.3. Preparação do inóculo comercial .....	69
4.3.3.1. Aplicação do inóculo comercial.....	69
4.3.4. Monitoramento da temperatura.....	70
4.3.5. Tempo de compostagem e revolvimentos.....	71
4.3.6. Amostragens e análises.....	72
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>77</b>
<b>5.1. Projeto preliminar .....</b>	<b>77</b>
<b>5.2. Projeto em escala real.....</b>	<b>80</b>
5.2.1. Temperatura .....	80

5.2.2. Umidade.....	81
5.2.3. pH e Condutividade elétrica .....	83
5.2.4. Teores de sólidos (totais, fixos e voláteis) .....	84
5.2.5. Composto orgânico.....	87
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
<b>6.1. Projeto Preliminar .....</b>	<b>91</b>
<b>6.2. Projeto em escala real.....</b>	<b>91</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>92</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>104</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e econômico da humanidade, bem como as mudanças no estilo de vida e nos padrões de consumo, tem sido um dos principais fatores para o aumento progressivo na geração de resíduos sólidos. As atividades humanas, são sempre procedidas pela geração de resíduos, os quais, tornam-se tema cada vez mais sérios, sendo questão crucial a gestão deste tipo de material.

Neste contexto, a gestão de resíduos tende a se concentrar na prevenção da geração e na reutilização dos resíduos sempre que possível. Entre os desafios está a responsabilidade de coletar, reciclar, tratar e dispor quantidades crescentes de resíduos sólidos sem prejudicar o meio ambiente.

Notoriamente estes desafios geram pressões crescentes e cada vez mais acirradas sobre os gestores de resíduos, exigindo novas estratégias gerenciais e tecnologias para o tratamento destes materiais. Se por um lado estas obrigações são benéficas e ansiosamente esperadas, o seu cumprimento, sob outra perspectiva, evidencia atualmente ineficiente gestão dos resíduos sólidos.

Nesta conjuntura, o Brasil ainda enfrenta sérios problemas relativos ao gerenciamento de resíduos sólidos, principalmente no setor de saneamento básico. Entre os resíduos diariamente produzidos nas estações de tratamento de esgotos, considerando os tipos de lodos de esgoto sanitário, sejam eles aeróbios ou anaeróbios, apresentando características específicas conforme os sistemas de tratamento em que foram gerados, o lodo de esgoto gerado em reatores UASB, não diferentemente dos outros tipos de lodos, também requer destaque especial devido ao fato de ser altamente contaminante, por apresentar elevada quantidade de microrganismos patogênicos e metais tóxicos, prejudiciais à saúde humana e do meio ambiente.

Como alternativa, comumente entre os tratamentos e disposições finais, o que mais se evidencia é a redução de volume e umidade para disposição em aterro sanitário.

Atualmente não há como negar algumas prerrogativas que vão ao encontro a este tipo de possibilidade, como a escassez de áreas aptas à construção de aterros sanitários e as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos regidas pela Lei Nº 12.305/10, regulamentada pelo decreto Nº 7.404/10, de 23 de dezembro de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).



Considerando as orientações no escopo desta Lei Federal, a compostagem de lodo de esgoto sanitário torna-se uma alternativa promissora, pois além de melhorar as qualidades físicas, químicas e biológicas do resíduo, também surge como alternativa em relação aos compostos químicos condicionadores de solos. Porém, apesar da compostagem apresentar-se como uma técnica aparentemente eficaz, deve-se levar em consideração o tempo necessário sob condições normais para que o resíduo seja bioestabilizado, humidificado e curado, o que leva por volta de 45 a 60 dias dependendo das características, físicas, químicas e biológicas do mesmo.

Nesta perspectiva, a investigação do benefício da utilização de inóculo comercial conhecido popularmente como acelerador de compostagem, quando aplicado no processo de compostagem de lodo de esgoto gerado em reatores UABS, consiste na motivação deste estudo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho foi investigar o possível benefício da utilização de inóculo comercial no processo de compostagem de lodo de esgoto sanitário gerado em reatores UASB.

### **2.2. Objetivo específico**

Os objetivos específicos deste estudo foram:

- executar projeto preliminar em teste de bancada para verificar a viabilidade do processo de compostagem em escala reduzida;
- avaliar em projeto de escala real a eficiência de inóculo comercial no processo de compostagem em relação aos parâmetros: temperatura, umidade, pH e sólidos (totais, fixos e voláteis);
- avaliar o composto orgânico obtido no processo de compostagem em escala real com utilização de inóculo comercial em relação aos parâmetros agronômicos: macro e micronutrientes, contaminante orgânico, relações agronômicas (CTC, CRA, C.O./N e CTC/C), considerando as Instruções Normativas da Secretaria de Defesa Agropecuária / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (IN SDA / MAPA).

---

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Tratamento de esgoto sanitário**

A disposição de esgoto sanitário *in natura* em corpos hídricos pode ocasionar problemas de ordem ambiental e de saúde humana pela propagação de doenças. Indo em sentido contrário a uma das frentes dos preceitos do saneamento ambiental.

Nesta perspectiva, vale ressaltar a necessidade da observância das imposições do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) por meio da Resolução N° 357/05, regulamentada pelo Decreto N° 99.274, de 06 de junho de 1990, e alterada pelas Resoluções 410/09 e 430/2011.

Assim o tratamento prévio dos esgotos sanitários tem por finalidade atribuir aos efluentes características físico-químicas e microbiológicas compatíveis com os requisitos para lançamento em corpos hídricos.

O tratamento do afluente, que compreende o esgoto sanitário bruto que chega a estação de tratamento, usualmente é dividido em tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário que pode compreender a biodegradação aeróbia ou anaeróbia e o tratamento terciário. Entretanto, a aplicação do tratamento terciário, ocorre somente quando se objetiva a remoção de poluentes específicos como compostos tóxicos ou não biodegradáveis, ou a remoção de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário.

#### **3.2. Geração de lodo de esgoto no Brasil**

De acordo com Alem Sobrinho (2001) e Metcalf e Eddy (2002), a produção de esgoto sanitário no Brasil situa-se entre 80 e 200 litros/hab.dia e em média cada ser humano produz diariamente cerca de 120 g de lodo centrifugado. Conforme Soares (2004) e Pedroza *et. al.* (2010), a produção média de lodo de esgoto sanitário no Brasil estão na ordem de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano, levando em consideração apenas 30% da população urbana atendida pelo sistema de coleta e tratamento, e caso os esgotos sanitários fossem totalmente coletados e tratados no país, a ordem de produção anual ultrapassaria a marca de 400 mil toneladas.

Considerando que a quantidade deste tipo de resíduo conseqüentemente cresce proporcionalmente ao incremento dos serviços de coleta e tratamento de esgoto sanitário, em atendimento a Lei N° 11.445/07, regulamentada pelo Decreto N° 7.217, de 21 de junho de 2010, conhecida como a Lei de Saneamento Básico, Andreoli (2002) expõe que esta

expansão tem potencial para multiplicar a produção desse tipo de resíduo no Brasil em cerca de 3 a 4 vezes em volume.

Segundo Oliveira (2000) *apud* Pedroza (2010), das unidades federativas do Brasil, o estado de São Paulo é o que concentra a maior parte das estações de tratamento de esgotos (ETE) e já excedeu há alguns anos a produção diária de 100 toneladas de lodo de esgoto sanitário seco por dia. Ainda como exposto pela SABESP (2001) *apud* Pedroza (2010), a produção diária das cinco maiores estações de tratamento de esgoto da companhia estava estimada em 540 toneladas em base seca para 2005 com previsão conforme exposto por Tsutya (2000) para 785 toneladas diárias no ano de 2015.

Neste contexto, conforme apresentado, a produção tende aumentar gradativamente, demonstrando que a geração e a necessidade da disposição do lodo, torna-se cada vez mais um desafio para as companhias de saneamento.

### **3.3. Geração de lodo de esgoto no sistema de tratamento**

Segundo Pedroza *et. al.* (2010), a produção de lodo a ser gerado é função precípua dos sistemas de tratamento utilizados para a fase líquida (esgoto sanitário). Em geral, todos os processos envolvidos no sistema de tratamento biológico produzem lodo de esgoto sanitário. Deste modo, os processos de tratamento que recebem o afluente compreendido pelo esgoto bruto em decantadores primários, vão dar origem ao lodo primário, compreendidos pelos sólidos sedimentáveis do esgoto bruto.

Todavia nos processos de tratamento, tem-se a produção do lodo biológico ou mais conhecido como lodo secundário. Este lodo é constituído pela própria biomassa que se desenvolveu devido ao alimento fornecido pelo esgoto afluente (bruto). De acordo com Pedroza *et. al.* (2010), caso a biomassa não seja removida, ela tende a se acumular no sistema, podendo eventualmente sair com o efluente final.

Conforme o tipo de planta que o sistema de tratamento de esgotos utiliza, existe a possibilidade de o lodo primário ser enviado para o tratamento juntamente com o lodo secundário, dando origem ao lodo conhecido como misto.

Geralmente as estações de tratamento de esgotos apresentam apenas o tratamento primário e secundário, entretanto como exposto por van Haandel e Marais (1999) *apud* Pedroza (2010), algumas ETES produzem lodo químico, quando incorporam a etapa físico-química de remoção de nutrientes durante o tratamento terciário.

Assim, o lodo de esgoto sanitário, constitui-se num substrato orgânico sólido e heterogêneo, que após desaguamento, pode apresentar entre 20 e 40% de sólidos totais, dependendo do processo utilizado (TWARDOWSKA *et. al.*, 2004).

Não obstante, evidencia-se que em todos estes casos a necessidade de descarte do lodo de esgoto, porém, como exposto por Metcalf e Eddy (2002), nem todos os sistemas de tratamento de esgoto necessitam propriamente que o descarte da biomassa gerada ocorra de forma contínua.

### **3.3.1. Resíduos e rejeitos no sistema de tratamento**

No sistema de tratamento de esgoto sanitário, tem-se a formação tanto de rejeitos como de resíduos.

A diferença entre um e outro é claramente apresentada no Art. 3º, incisos XV e XVI da Lei Nº 12.305/10 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a saber:

XV - rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;

XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;

Assim, no sistema de tratamento do esgoto bruto, a geração dos rejeitos ocorre em etapas que antecedem o tratamento, como forma de eliminar do sistema tudo o que é estranho o que possa ser prejudicial ao mesmo.

Entretanto, os rejeitos no sistema de tratamento de esgoto, apresentam elementos que são resíduos, mas pelo fato de estarem contaminados, não podem ser reutilizados ou reciclados, caracterizando-se como rejeito.

Deste modo, tem-se primeiramente a geração dos rejeitos de gradeamento, representados por materiais que chegam a estação junto com o esgoto bruto, e são compreendidos pelos mais diversos tipos de materiais (plásticos, vidros, papel, pequenos animais mortos, utensílios de higiene pessoal, dentre outros).

Em etapa seguinte, tem-se a geração de rejeitos da remoção de areia pelo desarenador. Estes rejeitos são compreendidos além da areia também por sementes e

outras partículas que passam pelo sistema de gradeamento devido a suas pequenas dimensões e são removidos com a finalidade de evitar a abrasão do sistema.

Como os rejeitos no sistema de tratamento de esgoto são elementos contaminados, estes rejeitos são armazenados em caçambas e recebem cal virgem para inertização biológica, e posteriormente são enviados ao aterro sanitário.

Em relação aos resíduos, os mesmos são produzidos durante o processo de tratamento e depende do sistema adotado, mas normalmente é o lodo de esgoto sanitário anteriormente apresentado.

### **3.4. Tratamento biológico de esgoto sanitário**

A degradação biológica da matéria orgânica, presente no esgoto sanitário, é um dos processos mais econômicos utilizados nas plantas de tratamento, pois esta degradação ocorre pela ação de agentes biológicos como as bactérias, protozoários e algas.

Trata-se de um processo que reproduz, de forma otimizada, os eventos de biodegradação que ocorrem na natureza, pela atuação dos microrganismos na remoção da matéria orgânica e, eventualmente, nutrientes.

O processo de tratamento biológico, ocorre pelo contanto efetivo entre a massa de microrganismos e a matéria orgânica presente no esgoto, de modo que essa matéria orgânica possa ser utilizada como fonte de energia pelos microrganismos. Assim, por meio de processos bioquímicos, a matéria orgânica é convertida em gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), em caso de anaerobiose, água e material celular.

Neste sentido, degradação da matéria orgânica pode ocorrer por meio do tratamento biológico aeróbio (com a presença de oxigênio) ou anaeróbio (sem a presença de oxigênio).

#### **3.4.1. Tratamento biológico aeróbio**

No sistema biológico aeróbio a matéria orgânica é convertida em gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), água e biomassa (lodo). A energia potencial presente nos resíduos termina na biomassa (lodo) cuja produção se torna grande problema.

Este tratamento utiliza microrganismos que necessitam de oxigênio para sua respiração e durante o processo de degradação, as substâncias orgânicas são assimiladas como “alimento” e fonte de energia, mediante processos oxidativos.

Nesse processo, o efluente precisa ser submetido a temperaturas específicas, estar com o pH e oxigênio dissolvido (OD) controlado, além de obedecer a relação da

---

massa com os nutrientes da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) que variam com a biota formada em cada estação.

Os microrganismos incumbidos por este processo de supressão da matéria orgânica são, em sua maioria, heterótrofos aeróbios e facultativos e promovem a remoção da matéria orgânica com mais eficiência.

Entre os sistemas aeróbios, os mais comuns são as lagoas aeradas, filtros biológicos e os sistemas de lodos ativados que proporcionam a melhor eficiência em remoção de cargas.

### **3.4.2. Tratamento biológico anaeróbio**

No sistema biológico anaeróbio a matéria orgânica é transformada em gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), água e biomassa (lodo). Sendo que a produção de biomassa é significativamente menor quando comparada aos processos aeróbios pois a taxa de crescimento dos microrganismos é baixa, sendo que a energia potencial do resíduo vai em parte para a biomassa e parte para metano.

Diferente do sistema aeróbio, este não necessita de oxigênio para ser usado pelos microrganismos. Entre os sistemas de tratamento anaeróbio, existem as lagoas anaeróbias, os tanques sépticos, os filtros anaeróbios e os reatores de alta taxa, capazes de receber maiores quantidades de carga orgânica por unidade volumétrica, como os reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) ou também conhecidos como RAFAs (Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente).

Cabe ressaltar, dependendo do tipo de efluente a ser tratado, do controle operacional do sistema e características dos equipamentos, há o risco de emissão de odores nesses sistemas, já que no processo de degradação anaeróbio, além da parte da matéria orgânica é convertida em gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), ocorre a formação de gases odorantes que segundo Lopes et. al. (2011) compreendem o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), mercaptanas, amônia, aminas com baixo peso molecular, indol, escatol, ácidos graxos voláteis, álcoois, aldeídos, cetonas e esterés.

## **3.5. Compostagem**

A compostagem é praticada desde a História antiga, porém de forma empírica. Gregos, romanos, e povos orientais já sabiam que resíduos orgânicos podiam ser retornados ao solo, contribuindo para sua fertilidade (FERNANDES; SILVA, 1999).

---

Segundo, Fernandes e Silva (1999) e Cooperband (2004), o processo de compostagem passou a ser pesquisado e cientificamente realizado de forma sistematizada somente a partir de 1920, com Albert Howard na Índia. O cientista alterou o modo antigo da técnica de compostagem para processos controlados, definindo bases científicas e incluindo a recirculação do chorume como parte do processo.

Naquela época, Albert Howard realizou o primeiro grande avanço na história da compostagem moderna em parceria com outros colaboradores. Juntos desenvolveram os procedimentos de compostagem e um método que ficou conhecido como “processo Indore” por causa da localidade em que foi posto em prática.

Diaz e Bertoldi (2007) e Addison (2000) complementam que os primeiros esforços para aplicação de compostagem na gestão de resíduos começam a ser documentados na Índia em 1933, e que Albert Howard, é considerado o fundador do movimento da agricultura orgânica, conhecido atualmente como o “Pai do método orgânico”.

Conforme Diaz e Bertoldi (2007), o processo Indore inicialmente usava apenas estrume animal e mais tarde passou a ser empilhado em camadas alternadas com materiais facilmente biodegradáveis como fezes humanas, lixo, e folhas em terreno aberto. Inicialmente o processo de compostagem durava cerca de 6 meses ou mais e o material era revolvido para aeração por duas vezes neste período. O lixiviado do material em compostagem era coletado e novamente introduzido para controlar a umidade das pilhas. Este artifício fazia com que o processo de compostagem ocorresse em meio aeróbio durante um curto período de tempo e depois na maior parte do tempo em meio anaeróbio, trazendo problemas operacionais e mau cheiro.

Ainda de acordo com os autores, o processo Indore foi modificado por outros pesquisadores e pelo próprio Albert Howard e utilizado pelo Ministério da Agricultura da Índia em 1949. Durante este período de aplicação e desenvolvimento do processo de compostagem, o Conselho Indiano de Agricultura em Bangalore melhorou o processo Indore e nomeou-o “processo Bagalore”. Uma modificação importante ao método Indore foi o uso de revolvimento da massa de resíduos com maior frequência com objetivo de manter o processo em meio aeróbio, favorecendo assim, a degradação mais rápida e a redução do período de compostagem (DIAZ; BERTOLDI, 2007).

A compostagem, segundo Fernandes e Silva (1999), Paz *et. al.* (2003), Budzialk *et. al.* (2004), Insam e Bertoldi (2007) e Qian *et. al.* (2014), pode ser definida como um

processo de biooxidação aeróbica exotérmica de um substrato orgânico heterogêneo, no estado sólido em que os compostos orgânicos sofreram mineralização e processos de neossíntese, assumindo natureza coloidal, denominado composto.

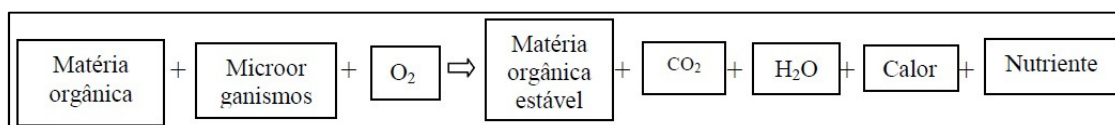
Neste sentido, a matéria orgânica é utilizada por microrganismos termófilos ou mesófilos aeróbios, resultando na produção de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, substâncias minerais e matéria orgânica estável. A higienização ou eliminação dos microrganismos patogênicos presentes no lodo está diretamente ligada à elevação de temperatura durante a oxidação e o tempo de exposição.

Assim, de acordo com Torres de Carvalho (2002) e Fels *et. al.* (2014), como resultado deste processo de biooxidação, observa-se a produção de um composto de fácil manipulação, isento de microrganismos patogênicos, estabilizado e higienizado, de coloração escura e odor não agressivo e aspecto agradável, rico em matéria orgânica umidificada com grande aptidão agrônômica, fornecendo nutrientes às plantas e atuando como condicionador de solos.

Entretanto, o processo de compostagem inicia-se com a oxidação da matéria orgânica facilmente degradável. Esta primeira fase é caracterizada pela decomposição. A segunda fase, é caracterizada pela estabilização, inclui não apenas a mineralização de moléculas lentamente biodegradáveis, como também processos mais complexos, tais como a humidificação de compostos ligno-celulósico.

Como o lodo de esgoto sanitário é constituído essencialmente por matéria orgânica, a Figura 1 apresenta o esquema simplificado para que ocorra a compostagem do mesmo.

**Figura 1.** Esquema simplificado de compostagem de lodo de esgoto sanitário



Fonte: (FERNANDES; SILVA, 2008)

Fernandes e Silva (2008), relatam que à medida que a compostagem se inicia, a população de microrganismos vai aumentando. No início do processo, há um grande crescimento de microrganismos mesofílicos. Com o aumento da temperatura resultante da atividade microbiológica na biodegradação, a população de microrganismos mesófilos diminui, enquanto a população de microrganismos termófilos aumenta.



---

Por serem extremamente ativos, os microrganismos termófilos provocam uma maior degradação da matéria orgânica, que conseqüentemente acaba elevando a temperatura o que elimina os organismos patogênicos.

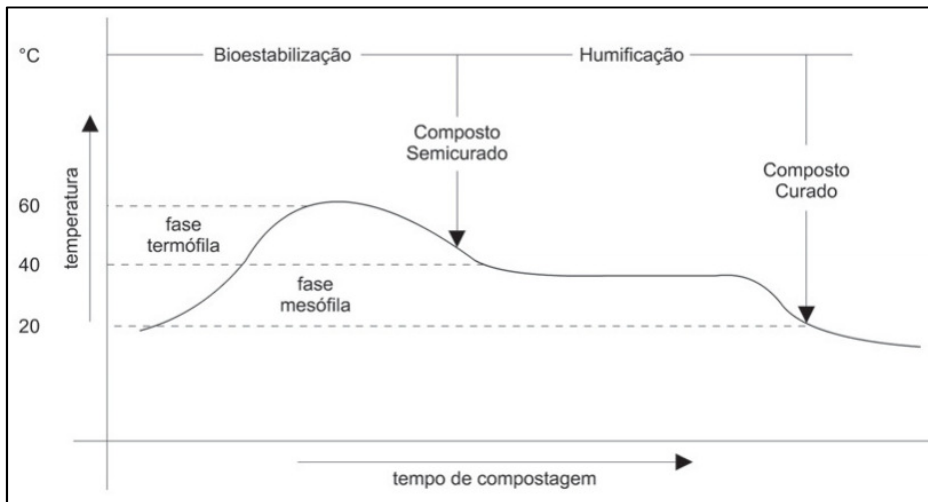
Conforme Haug (2000), a técnica de compostagem envolve um processo aeróbio controlado de tratamento de resíduos orgânicos, que passam por etapas sucessivas de transformação sob a ação de diversos grupos de microrganismos. O resultado é um processo bioquímico altamente complexo, envolvendo duas fases distintas, a termofílica e a mesofílica, que são as etapas de cura e maturação respectivamente. Em Kiehl (2012), o processo de cura representado pela fase termofílica pode ser dividido em duas fases, a fitotóxica e a semicura.

Insam e Bertoldi (2007) explicam que na fase fitotóxica ocorre a liberação temporária de fitotoxinas (metabólitos intermediários, amônia, ácidos minerais, etc.), liberação de calor, vapor de água e gás carbônico, compreendendo temperaturas entre 25° a 40° C. A fase de semicura corresponde a bioestabilização com temperaturas entre 50° e 55° C, que ocorre após 10 a 20 dias, caracterizada pela neutralização da fitotoxicidade.

Ainda conforme salientam Fernandes e Silva (2008), quando o substrato orgânico for sua maior parte transformada, a temperatura diminui e a população de microrganismos da fase termofílica se restringe, conseqüentemente a atividade microbiológica global se reduz de maneira significativa e os microrganismos da fase mesofílica se instalam novamente. Nessa fase, a maioria das moléculas facilmente biodegradáveis já foi transformada, o composto apresenta odor característico e já tem o início o processo de humidificação, característica típica da segunda etapa, denominado maturação.

Em síntese, como apresentado, o processo de compostagem envolve duas fases bem distintas a fase termofílica e a mesofílica, onde ocorrem três subfases respectivamente cura (fitotóxica e semicura) e a maturação. A Figura 2, ilustra as fases da compostagem durante o processo de degradação da matéria orgânica.

**Figura 2.** Verificação das temperaturas em função das fases da compostagem durante o processo de degradação da matéria orgânica

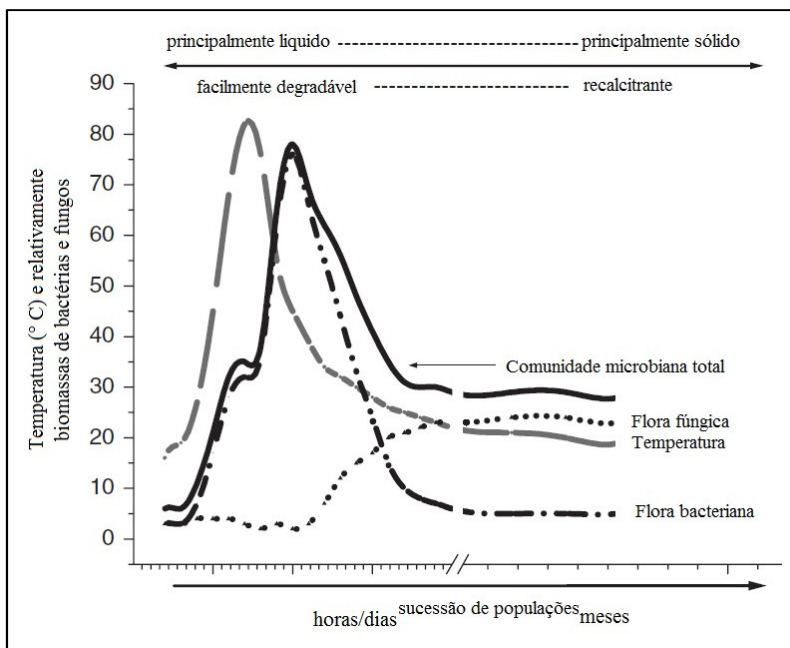


Fonte: (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000)

### 3.6. Fases da compostagem

Insam e Bertoldi (2007) expõem que a temperatura é um fator muito importante no processo de compostagem uma vez que, qualquer reação química ou bioquímica em determinada substância é influenciada pela temperatura, e que muitas propriedades físicas, químicas e biológicas também sofrem alteração conforme a temperatura. Entretanto, mudanças constantes nas condições de temperatura, pH, aeração, umidade, resultam em fases de crescimento de vários microrganismos, como ilustrado na Figura 3.

**Figura 3.** Tipos de microrganismos durante o processo de compostagem e faixas de temperatura



Fonte: Adaptado de Insam e Bertoldi (2007)

---

A temperatura do processo de compostagem é o principal fator que determinará a sucessão das populações de microrganismos e sua representatividade nas fases de degradação, sendo elas a mesofílica e a termofílica (REBOLLIO *et. al.*, 2008).

### **3.6.1. Fase mesofílica**

A fase mesofílica compreende a faixa de temperatura entre 25 e 45° C, e conforme Inácio e Miller (2009), nesta fase, quando a temperatura atinge o limite de 45° C, os microrganismos mesófilos morrem ou tornam-se dormentes, onde estes deverão recolonizar a biomassa da compostagem quando a temperatura decrescer.

Esta fase inicial, é rica em energia e compostos em abundância como açúcares e proteínas, todos facilmente biodegradáveis. De acordo com Insam e Bertoldi (2007), nesta fase a matéria orgânica é degradada por fungos, bactérias e actinobactérias, geralmente referidos como decompositores primários. Dependendo do método de compostagem, a contribuição destes microrganismos ou é insignificante ou, como é o caso especial da vermicompostagem considerável.

Ainda de acordo com os autores, o número de microrganismos mesófilos no substrato inicial é da ordem de três vezes superior ao número de microrganismos da fase termofílica, porém a atividade de decompositores primários induz no aumento de temperatura.

### **3.6.2. Fase termofílica**

De acordo com Inácio e Miller (2009), a fase termofílica compreende a faixa de temperatura entre 45 e 70° C, onde o grupo termofílico cresce melhor, tornando-se ativo e consumindo rapidamente o substrato disponível.

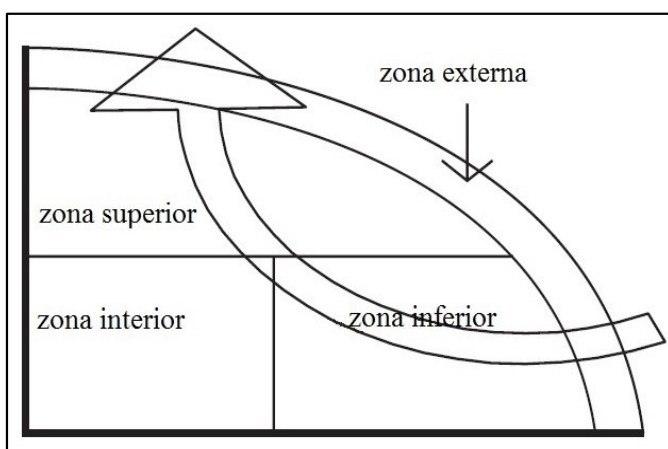
Insam e Bertoldi (2007) salientam que os microrganismos mesófilos morrem quando a temperatura aumenta e são decompostos pelos microrganismos termófilos, juntamente com o restante da matéria orgânica facilmente degradável. Neste processo, os microrganismos como os fungos termófilos têm crescimento máximo entre 35 e 55° C, enquanto que, em temperaturas mais elevadas seu crescimento é inibido.

Insam e Bertoldi (2007) constataam que termotolerantes, bactérias termófilas e actinobactérias permanecem ativos em altas temperaturas. Porém, explicam que apesar de a destruição da maior parte dos microrganismos ocorrer em temperaturas superiores a 65° C, a temperatura pode continuar a subir e exceder 80° C, no entanto, é provável que

este aumento de temperatura não ocorra devido a atividade dos microrganismos e sim por meio de reações exotérmicas abióticas, com a participação de actinobactérias com atividade enzimática.

Entretanto, no tratamento propriamente dito, a temperatura não é constante em todas as partes da leira de compostagem, logo é importante que a pilha seja revolvida e o material seja direcionado para o centro da leira onde a temperatura é mais alta. Insame Bertoldi (2007) exemplificam as zonas principais e fluxo de convecção em uma seção transversal de uma leira de compostagem, como apresentado na Figura 4.

**Figura 4.** Seção transversal de uma leira de compostagem (zonas principais e fluxo de convecção)



Fonte: Adaptado de Insam e Bertoldi (2007)

Conforme a Figura 4, a zona exterior de uma leira é muito mais fria e possui um bom fornecimento de oxigênio enquanto que, a zona interior é mais quente e possui pouco fornecimento de oxigênio. Já a zona inferior, quando comparada com a zona superior, é menos quente e possui menos disponibilidade de oxigênio que a zona superior, onde as temperaturas são altas e a disponibilidade de oxigênio é alta.

Assim, a fase termofílica é muito importante para higienização do composto. Nesta fase são destruídos os organismos patogênicos aos seres humanos e aos vegetais bem como sementes de ervas daninhas e larvas de insetos. No entanto, a presença de actinobactérias nesta fase é tão importante quanto o aumento de temperatura, pois por meio destes microrganismos são produzidos antibióticos que contribuem para a higienização do composto. É a fase de “bioestabilização” conhecida como maturação em que ocorre a degradação da matéria orgânica e o composto adquire característica de humos.

### **3.6.3. Fase de resfriamento (segunda fase mesofílica)**

Insam e Bertoldi (2007) expõem que nesta segunda fase mesofílica, quando a atividade dos microrganismos termofílicos cessa devido ao esgotamento dos substratos, a temperatura conseqüentemente começa a diminuir. A partir deste momento, por meio dos esporos sobreviventes oriundos de micro nichos protegidos ou por inoculação, os microrganismos mesofílicos recolonizam o substrato.

Assim, enquanto na primeira fase é dominada por microrganismos mesofílicos que possuem a capacidade de degradar açúcares e proteínas, nesta segunda fase mesofílica, é caracterizada por um número crescente de microrganismos (bactérias e fungos) com a capacidade de degradar amido ou celulose. De acordo com Durán (2004), a maioria dos microrganismos é compreendida por fungos produtores de enzimas necessárias à degradação de materiais lignocelulósicos (madeira, palhas, cascas, etc.) pertencem aos grupos *Ascomycetes*, *Deutoromycetes* e *Basidiomycetes*.

### **3.6.4. Fase de maturação**

Durante a fase de maturação, a qualidade do substrato diminui, alterando a composição das comunidades de microrganismos, resultando em um aumento na proporção de fungos e uma diminuição na proporção de bactérias. Assim, os compostos que não são degradáveis, como os complexos lignina-húmus, são formados e a tornasse predominante (INSAM; BERTOLDI, 2007).

## **3.7. Microrganismos envolvidos no processo de compostagem**

### **3.7.1. Bactéria**

As bactérias são organismos unicelulares, procarióticos, ou seja, sem núcleo celular nem organelos membranares. Segundo Insam e Bertoldi (2007), as bactérias foram por muito tempo negligenciadas no processo de compostagem, provavelmente por causa da melhor visualização dos fungos e actinobactérias. No entanto, em alguns processos de compostagem, como por exemplo a compostagem de lodo de esgoto sanitário, as bactérias são mais importantes que os fungos desde o início da compostagem. Se as temperaturas são mantidas abaixo de 60° C, mais de 40% dos sólidos são degradados dentro dos primeiros 7 dias, quase que inteiramente por meio da atividade bacteriana.

Conforme os autores, temperaturas entre 50° e 65° C favorecem o desenvolvimento de bactérias do gênero *Bacillus*, enquanto que acima de 65° C, as

bactérias do gênero *Bacillus stearothermophilus* são praticamente dominantes, a ponto de ser uma cultura pura.

As bactérias são importantes para decompor os açúcares, amidos e proteínas, entre outros compostos orgânicos de fácil digestão presentes nos resíduos sólidos orgânicos. O processo de decomposição de moléculas mais complexas para substâncias mais simples, ocorre por meio de reações enzimáticas. Assim, como evidencia Kiehl (1998) os microrganismos sintetizam enzimas que agriem e modificam o integrante orgânico.

De acordo com National Research Council (NRC) (1993), as bactérias são os microrganismos mais importantes, em função de seus efeitos bioquímicos, pois possuem a capacidade biológica de decompor até mesmo as matérias orgânicas de difícil decomposição, além de desempenharem um papel importantíssimo na destruição ou transformação dos contaminantes potencialmente perigosos em compostos de menor dano ao meio ambiente e a ser humano.

### **3.7.2. Actinobactéria**

Barka *et. al.* (2016) e Araújo (1998) esclarecem que actinobactérias são bactérias gram-positivas com alto teor de G+C (guanina e citosina) em seu DNA, são pertencentes a um grupo heterogêneo de bactérias filamentosas, desenvolvem hifas morfológicamente semelhantes às dos fungos, porém com diâmetros bem menores, de 0,5 a 1,0  $\mu\text{m}$  e, fisiologicamente, se assemelham a bactérias.

Actinobactérias termofílicas, como evidenciam Ouhdouch *et. al.* (2001) são microrganismos numerosos no processo de compostagem e exercem importantes funções na decomposição do material orgânico, bem como na incorporação de amônia ( $\text{NH}_3$ ). Os autores ressaltam que a degradação da matéria orgânica está relacionada com a capacidade desses microrganismos em degradar moléculas complexas e recalcitrantes, como celulose, lignina e lignocelulose.

Insam e Bertoldi (2007) e Lacey (1997), expõem que o desenvolvimento de actinobactérias é melhor quando está úmido e o suprimento de oxigênio é bom, favorecendo condições aeróbias. Além disso, quando a temperatura estiver acima dos 45° C e a matéria orgânica biodegradável já tiver sido consumida pelas bactérias. Cabe ressaltar que suas atividades são favorecidas em pH neutro ou ligeiramente alcalino.

### 3.7.3. Fungos

Os fungos são seres eucarióticos altamente eficientes na degradação de uma ampla gama de substratos, podendo apresentar-se sob a forma levuriforme, formar um pseudomicélio ou constituir hifas, que podem agrupar-se ou justapor-se, porém nunca formando um tecido verdadeiro (ESPOSITO; AZEVEDO, 2004).

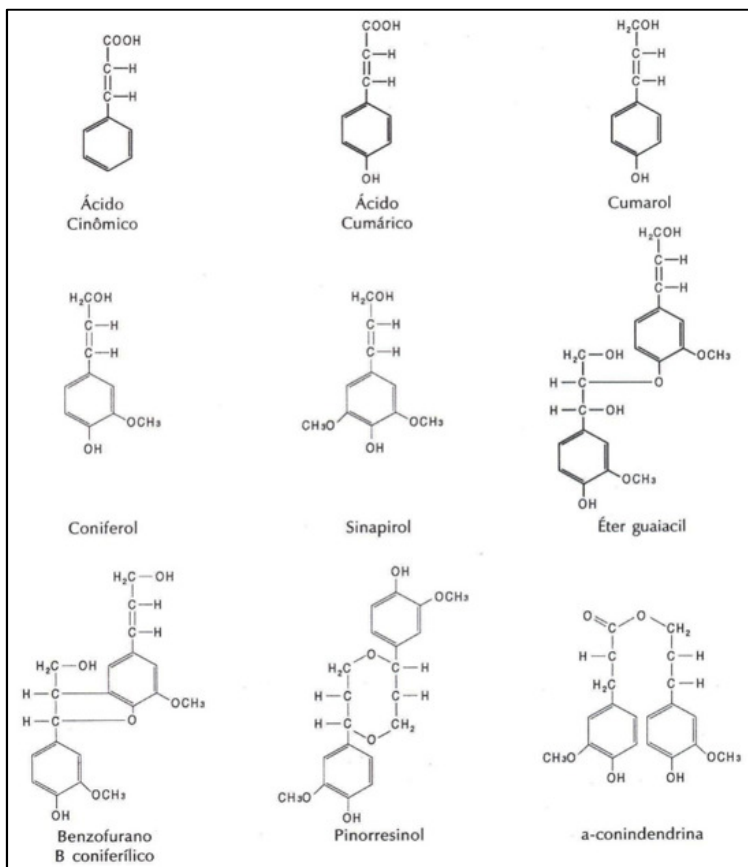
Constituem um grupo muito grande e heterogêneo encontrado virtualmente em qualquer nicho ecológico, são organismos heterótrofos, ou seja, não produzem seu próprio alimento durante a fase inicial do processo de compostagem. Os fungos competem com as bactérias, porém as taxas de crescimento de bactérias são superiores aos dos fungos em ordem e magnitude, e os fungos são facilmente superados.

Entretanto, Insam e Bertoldi (2007) destacam que uma boa oferta de oxigênio é mais importante para os fungos que para as bactérias. Por essas razões, mas também por causa da menor termotolerância, os fungos não desempenham uma atividade satisfatória na fase termófila, salvo exceção, se o substrato for rico em celulose e lignina, neste caso, os fungos são mais importantes que as bactérias em todo o processo de compostagem.

No entanto, os fragmentos da degradação da lignina, que é uma macromolécula tridimensional amorfa encontrada nas plantas terrestres, dão origem a diferentes derivados do fenilpropano, como o coniferol, o sinapirol e o cumarol que em conjunto com diferentes compostos aromáticos são moléculas de degradação lenta. Carvalho (2002) salienta que a lignina ainda reage com o nitrogênio para formar moléculas de lignoproteínas e nitrogênio heterocíclico, que não são encontrados nos vegetais.

Todavia, estas reações bioquímicas são executadas por fungos lignolíticos relativos à diversos gêneros como *Pleurotus*, *Polyporus*, *Ganoderma*, *Armillaria* e muitos outros, ao lado de algumas bactérias e actinomicetos. Todos estes microrganismos proporcionam em comum a produção de polifenoloxidasas que participam da degradação da lignina em especial do rompimento da ligação carbono-carbono (C-C). Assim, a polimerização destas moléculas pode ocorrer, produzindo material húmico. A Figura 5 ilustrado os produtos para a síntese e biodegradação da lignina.

**Figura 5.** Produtos para síntese e biodegradação da lignina



Fonte: (CARVALHO, 2002)

### 3.8. Parâmetros físico-químicos que afetam a compostagem

Em um processo de compostagem, bem estruturado e monitorado, cerca de 50% da matéria orgânica biodegradável sofre conversão em dióxido de carbono, água, sais minerais e energia. Outros 20% sofrem transformações metabólicas complexas e os 30% restantes são parcialmente degradados por processos aeróbios e anaeróbios com a produção de moléculas menos complexas (INSAM; BERTOLDI, 2007).

Geralmente, esta perda de matéria orgânica biodegradável varia entre 30 e 60%, e entre os fatores que afetam diretamente esta variação estão a aeração, temperatura, umidade, tipo de material, relação C/N, tamanho das partículas e pH.

Para que o processo de biodegradação e biossíntese da matéria orgânica aconteça de forma adequada, todos os fatores devem ser monitorados e estar em sinergia com os demais (KIEHL, 2012).



### 3.8.1. Aeração

Os autores Oliveira *et. al.* (2004) e Cerri *et. al.* (2008), apresentam que a presença de oxigênio na massa de compostagem é indispensável para a oxidação biológica da matéria orgânica, por se tratar de um processo fermentativo.

Neste sentido, o ar contido nos interstícios da massa de compostagem durante a atividade oxidativa realizada pelos microrganismos apresenta variações em composição (DIAZ; SAVAGE, 2007). Enquanto o teor de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) gradativamente aumenta, o de oxigênio (O<sub>2</sub>) diminui, conseqüentemente a média do teor de CO<sub>2</sub> mais o teor de O<sub>2</sub> no interior da massa representada por cerca de 20% na massa de ar. Desta forma, a massa de ar apresenta uma concentração de oxigênio variando de 15 a 20% e a dióxido de carbono de 0,5 a 5%.

Entretanto como esclarecem Fernandes e Silva (1999) e Diaz e Savage (2007), a diminuição de O<sub>2</sub> pode ocasionar o comprometimento do processo de compostagem, uma vez que, limita a ação dos microrganismos e conseqüentemente altera a velocidade de decomposição da matéria orgânica. Como consequência deste evento, ocorre o aumento da emissão de odores desagradáveis.

Apesar disso, algumas formas de controle estão na compactação moderada do material e revolvimento periódico. O ideal é que o revolvimento seja realizado a cada um ou dois dias, afim de evitar que os microrganismos anaeróbios excedam os aeróbios.

Esta prudência, em relação ao tempo de revolvimento, conforme Cerri *et. al.* (2008), tem como função evitar o processo de compostagem em estado de anaerobiose, onde ocorre fortes emissões de odores devido a liberação incompleta de nitrogênio aminado como amônia, em consequência da formação de aminas incompletas, mau cheirosas, que devem ser oxidadas para perder esta propriedade.

Assim, a oxidação anaeróbia é acompanhada de putrefação, formação de gases, que são emitidos na atmosfera como o gás de ácido sulfídrico (H<sub>2</sub>S) e mercaptanas, como dimetil sulfeto (DMS, Me<sub>2</sub>S), dimetildissulfeto (DMDS, Me<sub>2</sub>S<sub>2</sub>), metil mercaptano (metanotiol - MeSH) e outros produtos contendo enxofre, todos esses apresentam odor fétido.

Nesta conjuntura, Diaz e Savage (2007) relatam que, em uma leira de compostagem à 60° C, a quantidade de ar necessária para controlar temperatura e para

repor o O<sub>2</sub> consumido está na razão de 9:1 (razão da função de ar), sendo que em temperaturas mais baixas esta razão aumenta.

A aeração deve ser gerenciada para fornecer o oxigênio suficiente para a respiração aeróbia, o qual, por sua vez, promove a geração de calor enquanto ao mesmo tempo executa a remoção de calor associada.

Todavia, a determinação da quantidade de ar necessária para assegurar a aerobiose próximo da condição ideal é colocada como objetivo de muitos pesquisadores. Apesar disso, esta determinação é extremamente difícil pelo fato de não poder ser feito pelos métodos de análise desenvolvidos para águas residuais (DIAZ; SAVAGE, 2007).

### **3.8.2. Temperatura**

A variação de temperatura no processo de compostagem está diretamente relacionada às diferentes fases da compostagem. No início da compostagem a matéria orgânica é degradada pelos microrganismos mesófilos em temperaturas compreendidas entre 25 e 40° C (CARVALHO, 2002). Assim, conforme a degradação da matéria orgânica ocorre, a temperatura do composto aumenta e os microrganismos termófilos entram em atividade DEPLEDGE (2013).

Apesar disso, a evolução da temperatura durante o processo de compostagem está relacionada a vários fatores responsáveis pela geração de calor, como a quantidade de microrganismos, teor de umidade, aeração, granulometria dos materiais, entre outros fatores. Todavia, é cabível dizer que a temperatura é o resultado desses fatores.

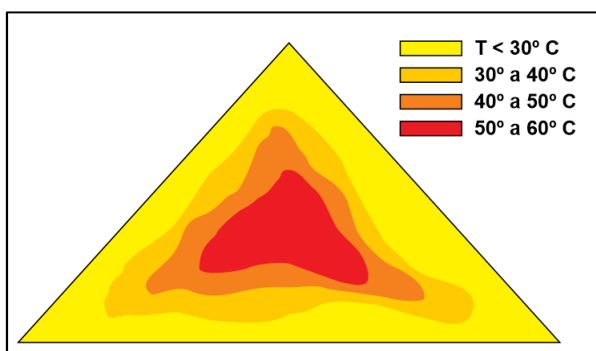
Assim sendo, em condições adequadas, a temperatura vai aumentar ao longo dos dias e adentrar a fase mesofílica, quando atingirá, rapidamente, temperaturas atribuídas a fase termofílica, mantendo-se constante por um período variável. Conforme Kiehl (2012), se as condições favoráveis forem mantidas durante o processo de compostagem, a temperatura gradativamente irá abaixar com a diminuição da atividade microbiológica e o composto entrará novamente na fase mesofílica, mantendo-se assim até o fim do processo de compostagem.

Segundo Pereira Neto (2007), a temperatura é um fator indicativo de equilíbrio biológico, de fácil monitoramento e que reflete a eficiência do processo de compostagem. Segundo Kiehl (2012), se no processo de compostagem, a leira apresentar temperaturas na ordem de 40 a 60° C, significa que o ecossistema está bem equilibrado e que a compostagem possui todas as chances de ser bem-sucedida. Entretanto se estiver em

desconformidade com a faixa de temperatura ideal, significa que algum ou alguns parâmetros físico-químicos (pH, relação C/N, umidade) não estão sendo considerados, comprometendo assim a atividade dos microrganismos. Ainda de acordo com o autor, a taxa de decomposição é máxima entre 45 e 55° C.

Na atualidade, por meio dos processos modernos de compostagem, a faixa de temperatura mais usual são as temperaturas termofílicas. Contudo, as temperaturas da fase mesofílica ocorrem nos primeiros dias e depois no final do processo, característico da segunda fase mesofílica, ou seja, a fase de maturação. Vale salientar que as temperaturas mesofílicas também ocorrem nas zonas periféricas da leira, no canto e na base, mesmo durante a fase de alta atividade microbiológica, característica da degradação ativa. A Figura 6 apresenta o perfil típico de temperaturas em uma leira de compostagem.

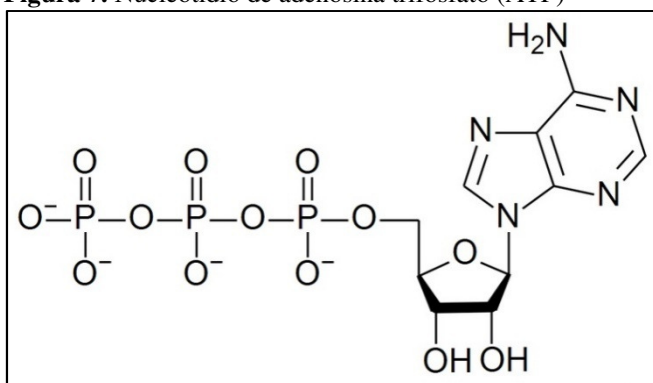
**Figura 6.** Perfil típico de temperaturas em uma leira de compostagem



Fonte: Adaptado de FERNANDES, 1999

Contudo, a compostagem é caracterizada por um processo exotérmico que produz uma quantidade relativamente grande de energia. De 40 a 50% dessa energia pode ser utilizada pelos microrganismos para sintetizar adenosina trifosfato (ATP). A energia restante é perdida na forma de calor na massa (DIAZ; SAVAGE, 2007).

Conforme Törnroth-Horsefield e Neutze (2008), a adenosina trifosfato, (Figura 7), é um nucleotídeo responsável pelo armazenamento de energia em suas ligações químicas. É constituída por adenosina, um nucleosídeo, associada a três radicais fosfato conectados em cadeia, sendo a energia armazenada nas ligações entre os fosfatos.

**Figura 7.** Nucleotídeo de adenosina trifosfato (ATP)

Fonte: (TÖRNROTH-HORSEFILD; NEUTZA, 2008)

Diaz e Savage (2007) apontam que o percentual entre 50 e 60% de energia que é perdido em forma de calor para massa de compostagem gera temperaturas que atingem facilmente a ordem de 70 a 90° C. Porém, as temperaturas elevadas inibem o crescimento de microrganismos, retardando a biodegradação da matéria orgânica, pois poucas espécies de bactérias termófilas desempenham atividades metabólicas acima de 70° C.

### 3.8.3. Umidade

Segundo Ahn *et. al.* (2008), a umidade é um parâmetro crítico, pois afeta diretamente a atividade dos microrganismos e a estrutura física. Diaz e Savage (2007) e Cerri *et. al.* (2008) expõem que no processo de decomposição da matéria orgânica, a umidade é essencial para toda a atividade microbiológica e deve estar presente em quantidades apropriadas durante todo o ciclo de compostagem. Isso porque, entre outros fatores, a estrutura dos microrganismos consiste em aproximadamente 90% de água, e na produção de novas células a água precisa ser obtida do meio.

No entanto, de acordo com Oliveira *et. al.* (2004), o material a ser decomposto deverá sempre estar úmido, entre os limites mínimos e máximos respectivamente de 30% e 70%. Valores abaixo do limite mínimo impedem a fermentação pela inibição dos microrganismos e, acima do limite máximo, expulsam o ar do ambiente pois a água ocupa todos os espaços vazios do meio, impedindo a livre passagem do oxigênio.

Por outro lado, o excesso de água, conforme evidenciam Anand e Apul (2014), pode criar condições anaeróbias, pois, como acrescentam Diaz e Savage (2007), o excesso de água tende a ocupar os poros das partículas e impede a troca gasosa. O resultado é um processo mais lento de degradação e obtenção de produto final de baixa qualidade. Pereira Neto (2007), complementa que a aerobiose provocada pelo excesso de umidade gera

gases fétidos, facilita a atração de vetores e produz líquidos lixiviados, comprometendo o local sob o aspecto sanitário.

Conforme Diaz e Savage (2007), o teor de umidade ótimo varia e depende essencialmente do estado físico e do tamanho das partículas do material a ser tratado. Isto porque os materiais possuem diferentes capacidades de retenção de água. Assim, de acordo com Fernandes e Silva (1999) e Kiehl (2012), a faixa de umidade ideal situa-se entre 40 e 60%, sendo valor ótimo 55%, e deve ser observada com atenção, visto que há perdas de água no processo devido evaporação ocasionada pela aeração do material em decomposição.

Yamada e Kawase (2006) e Diaz e Savage (2007), salientam que pouca umidade resulta em desidratação e prejudica o processo de compostagem. O composto formado é fisicamente estável, mas biologicamente instável.

#### **3.8.4. Relação C/N**

Durante o processo de compostagem, tanto teores de carbono quanto de nitrogênio são reduzidos, pois são consumidos durante a atividades metabólicas dos microrganismos.

Anand e Apul (2014) e Han *et. al.* (2014) discutem que a relação carbono/nitrogênio (C/N) é tão importante quanto os outros fatores físico-químicos uma vez que afeta a comunidade dos microrganismos e a qualidade do composto em grau de estabilização e nutrientes disponíveis. A relação C/N é usada para determinar a taxa de decomposição, além de ser fator limitante do processo. Chang e Hsu (2008) expressam que o tempo de compostagem e a acumulação de CO<sub>2</sub> produzido tem-se mostrados linearmente dependentes da relação C/N inicial. Isso significa que uma relação C/N inicial mais elevada pode resultar em um maior tempo para estabilização dos materiais do composto e mudar a comunidade de microrganismos.

Os microrganismos em suas atividades metabólicas utilizam cerca de 30 partes de nitrogênio para cada parte de carbono. Deste modo, o carbono é utilizado pelos microrganismos como fonte de energia e o nitrogênio para síntese de proteína. Neste contexto, Diaz e Savage (2007) acrescentam que cerca de 20 partes de carbono são oxidados a CO<sub>2</sub> para síntese de ATP, e 10 partes são utilizados para sintetizar o protoplasma.

Ainda de acordo os autores, a proporção inicial de C/N ótima para a maioria das matérias orgânicas é de cerca de 25 a 30 partes. Shammass e Wang (2007) afirmam que a relação C/N ideal para o processo de compostagem do lodo de esgoto sanitário deve estar na ordem de 25 a 35:1.

Han *et. al.* (2014) evidenciam que materiais com proporções iniciais baixas de C/N degradam rapidamente, porem pode ocorrer perda de nitrogênio por meio da volatilização da amônia (NH<sub>3</sub>) que é tóxica e pode limitar a atividade microbiológica. O resultado é a perda de nutrientes e geração de odores indesejados.

Diaz e Savage (2007) salientam que a razão para a perda de nitrogênio ocorre em função do mesmo estar em excesso às necessidades dos microrganismos, sendo convertido pelos microrganismos em NH<sub>3</sub>. Contudo, se a relação C/N é muito elevada, pode-se adicionar um resíduo nitrogenado ao composto, ou se a relação C/N é muito baixa, um resíduo carbonáceo pode ser adicionado, ambos com a finalidade de equilíbrio no sistema.

Segundo Carvalho (2002), via de regra, os húmus apresentam uma relação C/N de 12/1, enquanto o lodo de esgoto sanitário antes da compostagem apresenta relação C/N geralmente numa faixa de 7 a 10/1. Por conta disso há a necessidade de incluir agentes estruturantes ricos em carbono para elevar a relação C/N para cerca de 30, no início da compostagem. Diaz e Savage (2007) esclarecem que o teor de nitrogênio em determinado resíduo pode ser determinado facilmente pelo método de Kjeldahl, mas a determinação do teor de carbono não é tão simples. A dificuldade está em se obter uma amostra representativa, o alto custo do equipamento analítico e exigir uma habilidade considerável do analista.

### **3.8.5. Granulometria do material**

A granulometria do material tem grande importância no processo de compostagem, desempenhando o papel de administrar o movimento de líquidos e gases na leira (KIEHL, 2012). É um fator que interfere diretamente na aeração, logo, as partículas não podem ser muito pequenas, para evitar a compactação e favorecer a aeração, e não muito grandes para não reter pouca água e atrasar a degradação biológica da matéria orgânica.

Fernandes e Silva (1999) expõem que o lodo de esgoto sanitário normalmente apresenta granulometria muito fina. Neste caso, haveria dificuldade de realizar o processo

de compostagem somente com este material, pois fatalmente apresentaria problemas relativos à aeração devido à falta de espaços intersticiais entre as partículas.

Carvalho (2002) descreve que partículas entre 25 a 75 mm permitem uma porosidade de 30 a 36%, e que o lodo de esgoto pode ser misturado com serragem de madeira, folhas, cascas de árvores, galhos, etc.

Kiehl (2012) explica que assim como a umidade, a granulometria afeta a temperatura no sistema, pois material de dimensões mais grosseiras, formam leiras pouco densas, deixando muitos e grandes espaços vazios que permitem que o ar aquecido escape, conseqüentemente prejudicando os microrganismos.

### **3.8.6. pH**

De acordo com Beck-Friiset. al. (2013), durante o processo de compostagem, ácidos orgânicos de cadeia curta são gerados a partir dos resíduos sólidos biodegradáveis desde o início do processo. Komilis et. al. (2004) e Li et. al. (2013) acrescentam que os compostos orgânicos gerados, como os ácidos e álcoois, diminuem significativamente a atividade dos microrganismos, pois alteram o potencial hidrogeniônico (pH).

Carvalho (2002) e Anand e Apul (2014) explicam que níveis de pH muito baixos ou muito altos, diminuem e impedem a atividade dos microrganismos, porém fungos e actinomicetos são microrganismos tolerantes ao pH ácido. E, algumas populações de bactérias possuem melhor atividade metabólica em pH alcalino.

Bernal et. al. (2009), verificaram que pH mantido entre 6,7 a 9,0 ajuda a controlar as perdas de nitrogênio por volatilização da amônia. De acordo com Mancini et. al. (2007), ocorrem mudanças de pH nas diversas fases da degradação da matéria orgânica. Entretanto, estas alterações não são consideradas um fator crítico, pois ocorre naturalmente um fenômeno conhecido como auto-regulação, efetuado pelos próprios microrganismos. Contudo, uma faixa de pH ideal onde acontece o processo de compostagem está entre 6 a 9. Assim, valores fora desse intervalo acarretam uma redução ou até mesmo inibem as atividades dos microrganismos. Neste aspecto, como o pH do lodo de esgoto sanitário geralmente é situado próximo de 7,0 o processo de compostagem ocorre normalmente.

### 3.8.7. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (C.E.), conforme Paradela (2014), é um parâmetro usado para obter informações quanto a salinidade do composto, não permitindo, no entanto, a identificação dos sais presente na matéria.

Ainda de acordo com o autor, a determinação da condutividade é constantemente efetuada com o objetivo de se determinar o tipo de finalidade a que se destina o composto produzido. Todavia, no início do processo de degradação da matéria orgânica, observa-se um declínio da condutividade elétrica em relação ao substrato inicial, seguindo-se de um acréscimo gradual até o fim do processo.

Cabe salientar que o declínio da condutividade elétrica no início do processo, está relacionado com a fixação de amônia e outros íons durante a intensa atividade metabólica dos microrganismos, enquanto que o acréscimo gradual está relacionado com a fixação ao longo da maturação do composto produzido.

Conforme evidencia Kiehl (1998), a condutividade elétrica também é um indicador do grau de maturação do fertilizante (não devendo ultrapassar  $4000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ). Durante o processo de maturação do fertilizante, a fração mineral total aumenta, enquanto a condutividade elétrica (presença de sais) diminui. Assim, da fase inicial até a metade do processo de maturação, a condutividade pode cair em 50%.

### 3.9. Sistemas de compostagem

A flexibilidade do processo de compostagem admite tecnologias que variam desde sistemas mais simples e manuais até métodos mais complexos, como controle e monitoramento dos parâmetros envolvidos no processo de compostagem.

Deste modo, tem-se que o processo pode ser conduzido de formas distintas, compreendendo desde grandes instalações até pequenas unidades como no caso de compostagem doméstica.

É sabido, que existem dois únicos tipos de compostagem, ou seja, aquela que ocorre a presença de oxigênio, chamada de via aeróbia e a outra que ocorre sem a presença de oxigênio, chamada de via anaeróbia. Entretanto, a tecnologia de compostagem pode ser segmentada em três grandes grupos, sendo:

- Leiras de revolvimento (windrow);
- Leiras estáticas aeradas (aerated static pile);



- Reatores biológicos (reactorin-vessel);
  - Reatores de fluxo vertical;
  - Reatores de fluxo horizontal;
  - Reatores de batelada.

Conforme Fernandes e Silva (2008), os dois primeiros sistemas, leiras revolvidas (windrow) e leiras estáticas aeradas (static pile), geralmente são realizados a céu aberto, sendo em alguns casos realizados em áreas cobertas, enquanto que a compostagem por sistema de reatores biológicos apresenta várias alternativas de reatores e níveis de automação.

### **3.9.1. Compostagem por sistema de leiras revolvidas**

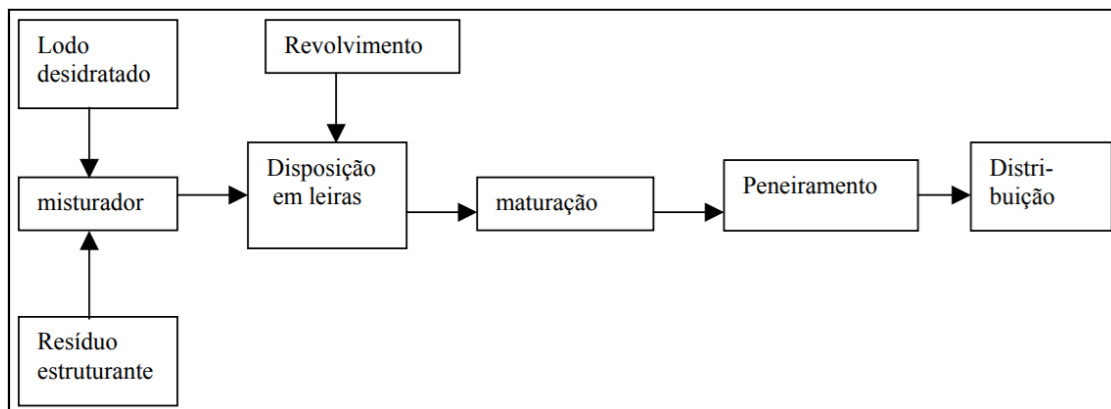
Dentre os três tipos de sistemas de compostagem, o de leiras revolvidas é o mais simples. A mistura de lodo e resíduo estruturante é disposta em longas leiras que são periodicamente revolvidas.

Neste sistema, a aeração é feita pela difusão e convecção do ar na massa do composto. Durante o revolvimento da leira o composto entra em contato com ar rico em oxigênio, que supre momentaneamente as necessidades de aeração do processo biológico. Contudo, em grandes sistemas, as leiras são aeradas em intervalos definidos, onde o revolvimento da massa em decomposição ocorre de forma mecanizada com o auxílio de máquinas.

Cabe enfatizar, que a temperatura da massa em compostagem é frequentemente monitorada, pois é usada como indicador de revolvimento. Assim, quando a temperatura na leira atinge temperaturas compreendidas entre 55° a 60° C, é realizado o revolvimento. O revolvimento é usado para homogeneizar a temperatura em todas as partes da leira, de modo a favorecer a degradação da matéria orgânica realizada pelos microrganismos da fase termofílica. Outro ponto importante do revolvimento é o controle da temperatura, pois temperaturas demasiadamente altas, acima de 80° C inativam e/ou suprimem os microrganismos, prejudicando o processo de compostagem.

A forma da leira pode variar de retangular a trapezoidal ou até mesmo triangular, sendo que está variação depende das características do processo de compostagem, dos materiais e equipamentos utilizados. A Figura 8, apresenta a compostagem do lodo pelo sistema de leiras revolvidas.

**Figura 8.** Esquema genérico aplicável à compostagem do lodo pelo sistema de leiras revolvidas



Fonte: (FERNANDES; SILVA, 2008)

A mistura do lodo com o agente estruturante pode ser feita por um misturador específico ou então na própria área de compostagem, quando existe a possibilidade de utilização de um equipamento mecânico eficiente. A Figura 9, ilustra um equipamento auto propelado, que se desloca sobre a leira de composto e realiza o revolvimento, deixando a leira com dimensão padrão fixadas pelo modelo do equipamento.

**Figura 9.** Equipamento para revolvimento de leiras de compostagem



Fonte: Acervo pessoal (2017)

Conforme Kuter (1995) *apud* Fernandes e Silva (2008), as leiras devem ser revolvidas no mínimo três vezes por semana, sendo que esta operação tem vários objetivos:

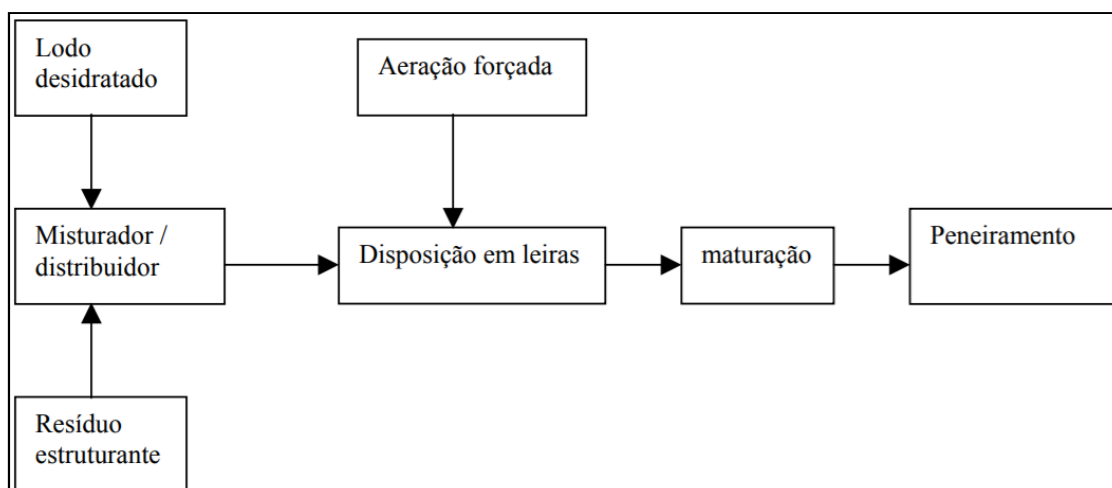
- Aerar a massa de resíduos em compostagem;
- Aumentar a porosidade do meio, que sofre uma compactação natural devido ao peso próprio;
- Homogeneizar a mistura;
- Expor as camadas externas às temperaturas mais elevadas do interior da leira melhorando a eficiência da desinfecção;
- Em alguns casos, reduzir a granulometria dos resíduos;
- Diminuir o teor de umidade do composto.

### 3.9.2. Compostagem por sistema de leiras estáticas aeradas

Este sistema é bem parecido com o sistema de leiras revolvidas, porem neste, a mistura de lodo e resíduo estruturante é colocada sobre uma tubulação perfurada, conectada a um soprador industrial.

Este sistema consiste em fornecer a aeração necessária por meio de injeção de ar sob pressão ou por sucção. A Figura 10, mostra esquematicamente o fluxo do processo.

**Figura 10.** Esquema simplificado do sistema de compostagem em leiras estáticas aeradas.

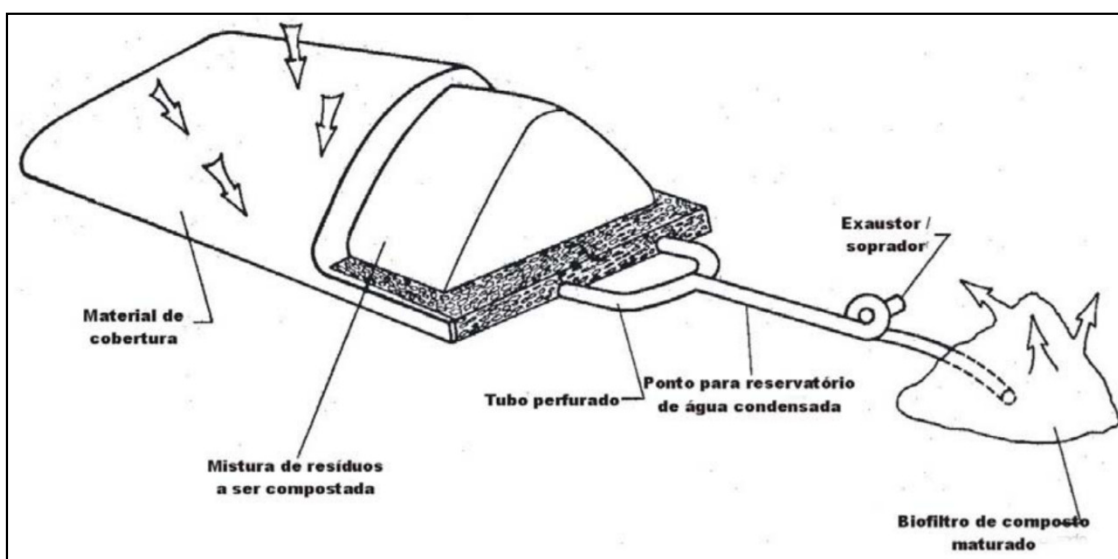


Fonte: (FERNANDES; SILVA, 2008)

No sistema não há revolvimento mecânico das leiras, e para manter a temperatura elevada no interior da pilha e para reduzir odores, as leiras são cobertas por composto peneirado. Assim, este sistema de compostagem é empregado para materiais homogêneos, como lodo de esgoto, não sendo recomendado para materiais heterogêneos.

Pelo fato de não ocorrer revolvimento mecânico neste sistema de compostagem, a mistura de resíduos sob as tubulações aeradas permanecem estáticas até o final da fase de bioestabilização do composto. A Figura 11, ilustra um sistema de compostagem com leiras estáticas aeradas.

**Figura 11.** Compostagem por sistema de leiras estáticas aeradas



Fonte: (FERANDES; SILVA, 2008)

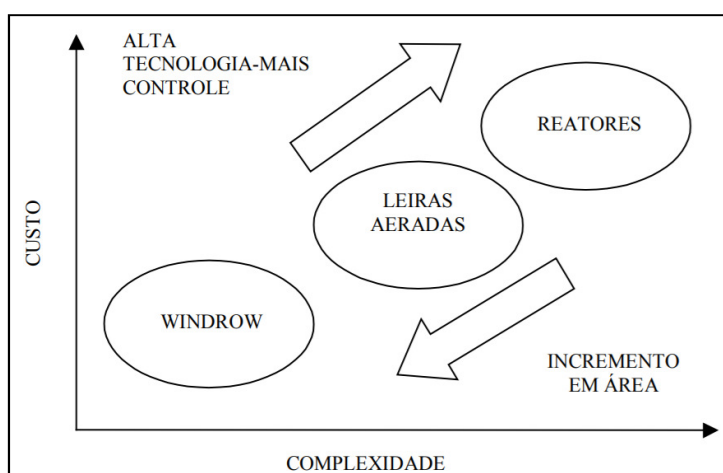
### 3.9.3. Compostagem por sistema de reatores biológicos

Este sistema tem como princípio o confinamento dos resíduos orgânicos em estruturas fechadas. Por ser realizado em estruturas fechadas, oferece a possibilidade de maior controle sobre todos os parâmetros importantes para o processo de compostagem. Este método também é denominado de "compostagem acelerada", pois o ciclo da fase termofílica é reduzido. Mesmo o sistema dispondo de uma fase termofílica mais rápida e intensa, após seu final, o composto ainda deve passar por um período de maturação, antes de ser utilizado.

Devido a homogeneidade do meio, inclusive com relação à temperatura, a compostagem em reatores também é tida como mais eficiente no controle dos patógenos. Outra característica desta alternativa é a maior facilidade para controlar odores, pois o sistema é fechado e a aeração controlada (FERNANDES; SILVA, 2008).

Ainda segundo os mesmos autores, a aeração é feita sob pressão e como o sistema é fechado, também se torna mais fácil monitorar a taxa de aeração e adequá-la às necessidades do processo. No caso, pode ser medido o teor de oxigênio dos gases de saída do reator e quando a porcentagem de oxigênio (O<sub>2</sub>) estiver próxima de 2%, aumenta-se a vazão de ar para impedir condições de anaerobiose. Conforme Shaub e Leonard (1996) existem diversos tipos de reatores, os reatores de fluxo vertical, horizontal e por batelada. A Figura 12 ilustra um comparativo dos sistemas de compostagem.

**Figura 12.** Comparação dos sistemas de compostagem em função dos custos e complexidade



Fonte: (SHAUB; LEONARD, 1996)

### 3.9.3.1. Reatores de fluxo vertical

Este tipo de sistema possui características muito semelhantes à de silos verticais onde os resíduos geralmente entram pela parte superior e percorrem o reator no sentido descendente. A aeração do composto ocorre pela injeção de ar em vários níveis ou apenas na parte inferior do reator.

O reator é dimensionado de tal forma que quando o composto chega à parte inferior do reator, a fase termófila terminou, e o composto é descarregado e transportado para que ocorra o processo de maturação.

### 3.9.3.2. Reatores de fluxo horizontal

Reatores de fluxo horizontal geralmente são de forma cilíndrica e dispostos na horizontal. Os resíduos adentram ao sistema por uma extremidade e saem pela outra, com o tempo de detenção suficiente para a realização da fase de altas temperaturas (termofílica). Neste sistema, a aeração ocorre pela injeção de ar sob pressão ao longo do trajeto.

### **3.9.3.3. Reatores de batelada**

O reator de batelada é distinto dos reatores de fluxo vertical e horizontal pelo motivo do composto ficar confinado no mesmo local, sem se deslocar. Contudo, o reator em batelada comumente possui sistema de agitação de massa de resíduos que pode ser por rotação lenta do reator em torno do seu próprio eixo, ou por um sistema misturador interno.

Este revolvimento por agitação ou por rotação, é necessário para limitar os caminhos preferenciais da passagem do ar, entretanto, alguns modelos de reatores por batelada, não são providos deste dispositivo.

### **3.9.3.4. Vantagens e desvantagens dos sistemas de compostagem**

Fernandes e Silva (2008) expõem que um bom composto não requer, necessariamente, de tecnologia sofisticada para ser produzido. Para obtenção de um composto de boas características é necessário um bom controle sobre a qualidade dos resíduos que serão utilizados, a definição criteriosa das proporções dos resíduos e bom monitoramento do processo microbiológico de compostagem. O Quadro 1, apresenta as principais vantagens e desvantagens de cada um dos diferentes sistemas de compostagem.

**Quadro 1.** Principais vantagens e desvantagens dos sistemas de compostagem

<b>Sistema de compostagem</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Leiras revolvidas</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baixo investimento inicial</li> <li>2. Flexibilidade para processar volumes variáveis de resíduos</li> <li>3. Simplicidade de operação</li> <li>4. Uso de equipamentos simples</li> <li>5. Produção de composto homogêneo e de boa qualidade</li> <li>6. Possibilidade de rápida diminuição do teor de umidade das misturas devido ao revolvimento</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Maior necessidade de área, pois as leiras têm que ter pequenas dimensões e há necessidade de espaço livre elas</li> <li>2. Problema de odor mais difícil de ser controlado, principalmente no momento do revolvimento</li> <li>3. Muito dependente do clima. Em períodos de chuva o revolvimento não pode ser feito</li> <li>4. O monitoramento da aeração deve ser mais cuidadoso para garantir a elevação da temperatura</li> </ol>
<b>Leiras estáticas aeradas</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baixo investimento inicial</li> <li>2. Melhor controle de odores</li> <li>3. Fase de bioestabilização mais rápida que o sistema anterior.</li> <li>4. Possibilidade de controle da temperatura e da aeração</li> <li>5. Melhor uso da área disponível que no sistema anterior</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Necessidade de bom dimensionamento do sistema de aeração e controle dos aeradores durante a compostagem</li> <li>2. Operação também influenciada pelo clima</li> </ol>
<b>Compostagem em reator</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Menor demanda de área</li> <li>2. Melhor controle do processo de compostagem</li> <li>3. Independência de agentes climáticos</li> <li>4. Facilidade para controlar odores</li> <li>5. Potencial para recuperação de energia térmica (dependendo do tipo de sistema)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Maior investimento inicial</li> <li>2. Dependência de sistemas mecânicos especializados, o que torna mais delicada e cara a manutenção</li> <li>3. Menor flexibilidade operacional para tratar volumes variáveis de resíduos</li> <li>4. Risco de erro difícil de ser reparado se o sistema for mal dimensionado ou a tecnologia proposta for inadequada.</li> </ol>

Fonte: (FERNANDES; SILVA, 2008)

### 3.10. Inóculo comercial (acelerador de compostagem)

De acordo com Eira (2004), no Brasil, a comercialização inóculos, também conhecidos como inoculantes utilizados para a compostagem datam da década de 1970, quando foram lançados alguns inóculos com a finalidade de obtenção de um composto orgânico de melhor qualidade em menor tempo de processamento. Estes inóculos comerciais, veiculados comercialmente como aceleradores de compostagem, são produtos biotecnológicos, geralmente na forma líquida, pelo qual sistemas biológicos são utilizados para tratar a poluição e restaurar a qualidade ambiental por meio da degradação dos poluentes. Possui como base a biorremediação, que de acordo com Andrade *et. al.* (2010), compreende o uso de microrganismos externos (effective microorganisms (EM), sigla em inglês para microrganismos efetivos), via inoculação, que podem ser adicionados ao processo de compostagem, geralmente compreendidos por fungos e bactérias, de ocorrência natural, nativos ou cultivados, para decompor ou reter contaminantes em resíduos, com a finalidade favorecer e incrementar a velocidade natural de degradação. Além destes microrganismos, os actinomicetos, são considerados um terceiro e maior componente, pois possuem alta capacidade de degradar compostos recalcitrantes.

Apesar de vários produtos inóculos comerciais serem facilmente encontrados tanto no mercado nacional quanto internacional, suas constituições são diferentes de produto para produto conforme o fabricante e apenas alguns fabricantes revelam quais microrganismos estão presentes nestes produtos.

De acordo com Souza (2016), ainda não são bem esclarecidas, as funções das populações de microrganismos e as características bioquímicas da maioria destes inóculos comerciais no processo de compostagem. Em contrapartida, os rótulos destes produtos, estipulados por seus fabricantes, apresentam diversos benefícios, onde o que mais se evidencia é o aumento da taxa de degradação da matéria orgânica.

De acordo com Jusoh *et. al.* (2013), os microrganismos efetivos, foram desenvolvidos pelo professor Dr. Teruo Higa na década de 1970 na Ryukyus University, localizada em Okinawa no Japão. Basicamente o EM foi desenvolvido para sistemas de cultivo natural ou orgânico, no entanto, com pesquisas mais aprofundadas, seus usos foram expandidos para resolver alguns problemas ambientais. Ainda de acordo com os autores, os resultados preliminares evidenciaram que o uso de EM aumentou os teores de macro e micronutrientes, sugerindo que a aplicação da EM é adequada para aprimorar a mineralização do processo de compostagem.



### **3.11. Legislação e aspectos legais**

Tem-se incontestavelmente a necessidade de proteção do meio ambiente, assim leis e regulamentos contribuem para a restrição e controle da poluição estabelecendo padrões para lançamento ou disposição final de resíduos, bem como delega a conduta dos agentes responsáveis pelos sistemas de produção.

Neste sentido, são abordados a seguir alguns aspectos referentes a legislação aplicável aos resíduos sólidos urbanos (lodo de esgoto sanitário), ao composto agrícola e ao uso de inóculos comerciais.

#### **3.11.1. Política Nacional do Meio Ambiente**

A matéria do meio ambiente só foi inserida em nosso ordenamento jurídico por meio da Lei Nº 6.938/81, regulamentada pelo Decreto Nº 99.274, de 06 de junho de 1990, que estabeleceu a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), a qual constituiu o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA) e criou o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA).

Assim, as regulamentações sobre a proteção do meio ambiente são de responsabilidade do SISNAMA, que tem o papel de estabelecer o compromisso de garantir o equilíbrio entre os impactos gerados pela industrialização e a capacidade de suporte da natureza. Neste contexto, os estados brasileiros, observando e levando em consideração suas características regionais, tem elaborado regulamentos específicos com padrões para controle de poluição do meio ambiente baseados nos padrões estabelecidos pelo SISNAMA.

Cabe salientar, que esta mesma lei, institui a sistemática da avaliação de impacto ambiental, para atividades modificadoras ou potencialmente modificadoras da qualidade ambiental, como a criação da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA). Também no âmbito da referida lei, ficam instituídas as licenças a serem obtidas ao longo da existência das atividades modificadoras ou potencialmente modificadoras da qualidade ambiental.

#### **3.11.2. Constituição Federal**

Por meio da Constituição da República Federativa do Brasil, promulgada em 1988, foi estabelecido no artigo 23, inciso VI, que “compete à União, aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios, proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas”.

Ainda na respectiva constituição, no artigo 24, no inciso VI, estabelece a competência da União, dos Estados e do Distrito Federal em legislar concorrentemente sobre “(...) proteção do meio ambiente e controle da poluição”. Desse modo, como regido no art. 30, incisos I e II, estabelece que cabe ainda ao poder público municipal “legislar sobre os assuntos de interesse local e complementar a legislação federal e a estadual no que couber”.

### **3.11.3. Lei dos Crimes Ambientais**

A Lei Nº 9.605/98, regulamentada primeiramente pelo Decreto 3.179, de 21 de setembro de 1999 e posteriormente revogada pelo Decreto 6.514, de 22 de julho de 2008, conhecida como Leis dos Crimes Ambientais, estabelece em seu Capítulo V, Seção III, Art. 54., que se constitui crime: “Causar poluição de qualquer natureza que resultem ou possam resultar danos à saúde humana, ou que provoque a morte de animais ou a destruição significativa da flora”.

Deste modo, uma das condicionais com a sua respectiva sanção é regida no parágrafo 2º, inciso V, “Se o crime (...) ocorrer por lançamento de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos (...) em desacordo com as exigências estabelecidas em leis ou regulamentos. A pena prevista é de reclusão de um a cinco anos”.

Conforme a supracitada lei, a mesma impõe sanções penais a quem causar atividades lesivas ao meio ambiente e incrimina cível e penalmente, quem provocar, pela emissão de efluentes ou carreamento de materiais, o perecimento de espécies da fauna aquática existentes em rios, lagos, açudes, lagoas, baías ou águas jurisdicionais brasileiras.

Como consta no Capítulo I, Art. 3º, responsabiliza-se o gerente que, sabendo da conduta criminosa de outrem, deixar de impedir a sua prática, quando podia agir para evita-la. Sendo ainda que a responsabilidade das pessoas jurídicas não exclui as das pessoas físicas, autoras, co-autoras ou partícipes do mesmo fato.

### **3.11.4. Política Nacional de Resíduos Sólidos**

A Lei Nº 12.305/10, regulamentada pelo Decreto Nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às

responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.

Uma das imposições desta lei, refere-se a sua observância por parte das pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, responsáveis, direta e indiretamente, pela geração de resíduos sólidos e as que desenvolvem ações relacionadas à gestão integrada ou gerenciamento de resíduos sólidos. Entretanto esta legislação não se aplica aos rejeitos radioativos, que são regulados por legislação específica.

No que condiz esta lei a rejeitos, no Capítulo II, Art. 3º, inciso XV, é definido como “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentam outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”.

A PNRS, no que se refere à gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, no Capítulo I, Art. 9, estabelece uma ordem de prioridade na gestão e gerenciamento. Assim, a prioridade inicia pela não geração de resíduos, caso seja possível, seguida da redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Em relação às responsabilidades dos geradores de resíduos sólidos, no Capítulo III, Seção I, Art. 27, inciso 1º, rege que:

“A contratação de serviços de coleta, armazenamento, transporte, transbordo, tratamento ou destinação final de resíduos sólidos, ou de disposição final de rejeitos, não isenta as pessoas físicas ou jurídicas referidas no art. 20 da responsabilidade por danos que vierem a ser provocados pelo gerenciamento inadequado dos respectivos resíduos ou rejeitos”.

Conforme apresentado, subtende-se os resíduos gerados no sistema de tratamento de esgoto sanitário, propriamente o efluente e o lodo de esgoto sanitário, pois o inciso remete aos resíduos gerados nas atividades de serviços públicos de saneamento básico, excetuados o lixo domiciliar e o de varrição conforme a alínea “e”, do Art. 13, Capítulo I.

### **3.11.5. Política Estadual de Resíduos Sólidos**

No Estado de São Paulo, por meio da Assembleia do Estado de São Paulo, com o intuito de assegurar o uso adequado dos recursos ambientais, a Lei Estadual N° 12.300/06, regulamentada pelo Decreto N° 54.645, de 5 de agosto de 2009, institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos.

Esta lei conforme consta no Art. 1º, inciso IX, adota o princípio do poluidor-pagador o qual é uma norma do direito ambiental que consiste em obrigar o poluidor a arcar com os custos da reparação do dano por ele causado ao meio ambiente.

No que tange aos resíduos sólidos, esta lei enquadra como resíduos industriais os resíduos de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), como disposto no Art. 6º, inciso II, a saber:

“resíduos industriais: os provenientes de atividades de pesquisa e de transformação de matérias-primas e substâncias orgânicas ou inorgânicas em novos produtos, por processos específicos, (...), inclusive resíduos provenientes de Estações de Tratamento de Água - ETAs e Estações de Tratamento de Esgoto – ETES”.

Assim impõe no Art. 32º, a obrigatoriedade aos geradores de resíduos industriais a responsabilidade pelo seu gerenciamento, desde a sua geração até a sua disposição final.

### **3.11.6. Norma CETESB**

A Norma P 4.230/99, refere-se a uma normativa desenvolvida pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, fundamentada na legislação da companhia norte americana United States Environmental Protection Agency (USEPA) e por meio de recomendações Alemãs.

Esta norma estabelece os procedimentos, critérios e requisitos para a elaboração de projetos, implantações e operações de sistemas de aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico de despejos líquidos sanitários ou industriais, em áreas agrícolas, visando atendimento de exigências ambientais, aplicada a todos os sistemas operados no Estado de São Paulo.

Esta norma refere-se exclusivamente a lodos oriundos de sistemas de tratamento biológico de despejos líquidos sanitários e industriais. Porém a P 4.230/99 estabelece que os lodos de sistemas de tratamento biológico e os de despejos líquidos sanitários tratados de forma adequada para sua aplicação na agricultura, também denominados biossólidos,

serão denominados simplesmente lodos e determinou que a utilização do lodo em áreas agrícolas só será aceita se proporcionar um benefício para a cultura pretendida para o local e se forem obedecidos os critérios ambientais estabelecidos nesta norma.

### **3.11.7. Resoluções CONAMA**

#### **3.11.7.1. Resolução CONAMA 375/06**

O CONAMA, no uso das competências que lhe são conferidas pelos Arts. 6º, inciso II e 8º, inciso VII, da Lei Nº 6.938/81, regulamentada pelo Decreto Nº 99.274/90, institui a Resolução Nº 375/06.

Esta resolução define critérios e procedimentos, para uso agrícola de lodo de esgoto sanitário gerados em estações de tratamento de esgoto e seus derivados, visando benefícios à agricultura e evitando riscos à saúde pública e ao ambiente.

De acordo com a resolução, o lodo de esgoto corresponde a uma fonte potencial de riscos à saúde pública e ao meio ambiente e potencializa a proliferação de vetores e organismos nocivos. Reputa que devido a fatores naturais e acidentais que o lodo de esgoto é resíduo que pode conter metais tóxicos, compostos orgânicos persistentes e microrganismos patogênicos em concentrações nocivas e ao meio ambiente.

Deste modo, dispõe da necessidade de dispor o lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto sanitário de forma adequada à proteção do meio ambiente e da saúde da população.

A Resolução Nº 375/06, mesmo dispondo da possibilidade de uso do lodo de esgoto na agricultura, que o resíduo para sua produção, compra, venda, cessão, empréstimo ou permuta de lodo de esgoto e seus produtos derivados, além do previsto na referida resolução, deverá ser observado o disposto no Decreto Nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que regulamenta a Lei Nº 6.894/80, a qual dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura.

Assim, outros dois pontos significativos que devem ser observados nesta resolução é o disposto no Art. 3º, incisos 1º e 2º, da não aplicabilidade desta resolução para lodo proveniente de estação de tratamento de efluentes de processos industriais, juntamente a vetação para utilização agrícola de lodo proveniente de estação de

tratamento de efluentes de instalações hospitalares, portos e aeroportos, bem como resíduos de gradeamento e de desarenador, materiais lipídico sobrenadantes de decantadores primários, das caixas de gordura e dos reatores anaeróbios, lodos provenientes de sistema de tratamento individual, coletados por veículos, antes de seu tratamento por uma estação de tratamento de esgotos, lodo de esgoto não estabilizado e lodos classificados como perigosos de acordo com as normas vigentes.

### **3.11.7.2. Resolução CONAMA 481/17**

Esta resolução estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos. O principal objetivo desta resolução é proteger o meio ambiente reestabelecendo o ciclo natural da matéria orgânica e seu papel natural de fertilizar os solos.

Segundo a resolução todas as unidades de compostagem terão que atender requisitos de prevenção e controle ambiental, como: adoção das medidas de controle ambiental necessárias para minimizar lixiviados e emissão de odores; proteção do solo por meio da impermeabilização; implantação de sistemas de coleta, manejo e tratamento dos líquidos lixiviados gerados e das águas pluviais; implantação de sistema de recepção e armazenamento de resíduos orgânicos in natura garantindo o controle de odores, de geração de líquidos, de vetores e de incômodos à comunidade; adoção de medidas de isolamento e sinalização da área; controle dos tipos e das características dos resíduos a serem tratados; controle da destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e líquidos gerados pela unidade de compostagem.

Entretanto a Resolução nº 481 se aplica as unidades de compostagem de alto impacto ambiental. Essa resolução não se aplica a processos de compostagem de baixo impacto ambiental, desde que essas unidades utilizem o composto para uso próprio ou comercializem diretamente com o consumidor final. E também, não se aplica aos resíduos orgânicos industriais.

Os estabelecimentos sujeitos à elaboração de Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos devem priorizar a destinação dos resíduos orgânicos para a compostagem ou alternativas de reciclagem de resíduos orgânicos, respeitando a Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Entre os vários critérios de controle e qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, destacam-se o controle ambiental, termofílico, carbono/nitrogênio, compostos com parâmetros fora.

Outro ponto muito importante nesta resolução, é em relação aos resíduos que podem ser utilizados no processo de compostagem. A resolução determina que durante o processo de compostagem os resíduos orgânicos utilizados poderão ser os in natura ou que passaram por algum tratamento. Sendo permitido a adição lodos de estações de tratamento de esgoto sanitário e resíduos orgânicos industriais, mediante autorização prévia do órgão ambiental, e em acordo com a legislação. Entretanto a resolução veda a utilização de: resíduos perigosos, de acordo com a legislação e normas técnicas aplicáveis; lodo de estações de tratamento de efluentes de estabelecimentos de serviços de saúde, de portos e aeroportos; lodos de estações de tratamento de esgoto sanitário quando classificado como resíduo perigoso.

### **3.11.8. Normas NBR**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com base no Regulamento Técnico Federal Norte Americano denominado “Code of Federal Regulation (CFR) – title 40 – Protection of Environmental – Part 260-265 – Hazardous waste management (1993)”, elaborou a Norma 10.004:2004, a qual foi elaborada em 1987 e revisada em 2004.

A finalidade desta norma é a classificação dos resíduos sólidos quanto a sua periculosidade, considerando seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Entretanto, não é objetivo desta norma permitir ou não a utilização de resíduos sólidos, incumbindo a mesma apenas classifica-los como perigosos ou não perigosos, servindo de ferramenta os diversos setores envolvidos com o gerenciamento de resíduos sólidos.

Neste sentido, o lodo de esgoto, é considerado como um resíduo sólido, e deve estar sujeito a todas as regulamentações especificadas nesta norma. Assim, para a gestão dos resíduos sólidos, a ABNT, possui normas que tratam sobre o assunto, como segue:

- NBR 10004:2004: é a norma que trata sobre os resíduos e proporciona a sua classificação;

- NBR 10005:2004: é a norma que trata sobre a lixiviação dos resíduos e proporciona o método de ensaio;
- NBR 10006:2004: é a norma que trata sobre a solubilização de resíduos e proporciona o método de ensaio;
- NBR 10007:2004: é a norma que trata sobre a amostragem de resíduos e proporciona os procedimentos.

Ainda conforme a norma, os resíduos sólidos classificam-se, como segue:

- Resíduos classe I: Perigosos;
- Resíduos classe II: Não perigosos;
  - Resíduos classe II A: Não inertes;
  - Resíduos classe II B: Inertes.

Neste contexto, o lodo de esgoto sanitário, proveniente de estação de tratamento de esgoto, são considerados como resíduos sólidos não perigosos, inserido na Classe II A: Não inertes. Podem ter como destinação a incineração, a compostagem e lançamento no mar, desde que possuam autorização das autoridades competentes.

No entanto, deve se observar que o lodo de ETE que tem suas características modificadas por contaminação de efluentes industriais, passa a ser inserido na Classe I: Perigosos.

### **3.11.9. Instruções Normativas SDA/MAPA**

No Brasil, o órgão federal responsável pela legislação acerca da produção e comercialização dos insumos agrícolas, incluindo fertilizantes, biofertilizantes, corretivos, entre outros, é o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Desta maneira, toda estrutura legal que aborda a questão está fundamentada, na Lei N° 6.894/80, que foi alterada pelas Leis N° 6.934/1981 e N° 12.890/2013.

Cabe salientar que a Lei N° 6.894/1980, regulamentada pelo Decreto N° 4.954/2004, foi alterada pelos Decretos N° 8.059/2013 e N° 8.384/2014.



No entanto, uma observação muito importante no corpo do texto do decreto, no Art. 2º, inciso III, alíneas “b” e “n” respectivamente, definem fertilizante orgânico e fertilizante orgânico composto, sendo:

“b) fertilizante orgânico: produto de natureza fundamentalmente orgânica, obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais”

“n) fertilizante orgânico composto: produto obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matéria-prima de origem industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isoladas ou misturadas, podendo ser enriquecido de nutrientes minerais, princípio ativo ou agente capaz de melhorar suas características físicas, químicas ou biológicas”.

Assim, como apresentado nos textos, fica claro a possibilidade legal de transformar o lodo de esgoto sanitário em um produto denominado fertilizante orgânico, que seja reconhecido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Entretanto, outras especificações sobre o assunto são expostas em algumas Instruções Normativas da Secretaria de Defesa Agropecuária (IN SDA), elaboradas pelo MAPA. Entre as IN SDA, podemos citar IN SDA 10/2004, IN SDA 27/2006, IN SDA 35/2006 e a IN SDA 25/2009, como seguem:

IN SDA 10/2004: Aprova as disposições sobre a classificação e os registros de estabelecimentos e produtos, as exigências e critérios para embalagem, rotulagem, propaganda e para prestação de serviço.

IN SDA 27/2006: Dispõe sobre fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes, para serem produzidos, importados ou comercializados, deverão atender aos limites estabelecidos nos Anexos I, II, III, IV e V desta Instrução Normativa no que se refere às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas.

IN SDA 25/2009: Aprova as Normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura.

IN SDA 35/2006: Fica aprovada as normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura, na forma do Anexo a esta Instrução Normativa.

Cabe salientar que a IN SDA 25/2009, é a revogação da IN SDA 23/2005, e que em seu anexo 1, Art. 1º, define lodo de esgoto como:

“(…) matéria prima proveniente do sistema de tratamento de esgotos sanitários, possibilitando um produto de utilização segura na agricultura, atendendo aos parâmetros estabelecidos no Anexo III e aos limites máximos estabelecidos para contaminantes.”

Neste mesmo anexo da IN SDA 25/2009, no Art. 2º, são classificados os fertilizantes orgânicos, em quatro classes, sendo:

“Classe "A": fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza matéria-prima de origem vegetal, animal ou de processamentos da agroindústria, onde não sejam utilizados, no processo, metais pesados tóxicos, elementos ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos, resultando em produto de utilização segura na agricultura;

Classe "B": fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza matéria-prima oriunda de processamento da atividade industrial ou da agroindústria, onde metais pesados tóxicos, elementos ou compostos orgânicos sintéticos potencialmente tóxicos são utilizados no processo, resultando em produto de utilização segura na agricultura;

Classe "C": fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda de lixo domiciliar, resultando em produto de utilização segura na agricultura; e

*Classe "D": fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura”.*

Assim, o lodo de esgoto bem como o composto deste lodo, é classificado como Classe D, conforme a referida IN SDA 25/2009. Esta classificação dos fertilizantes orgânicos, visa restringir a utilização dos fertilizantes com alto potencial poluidor, atribuindo aos fertilizantes de Classe D, as seguintes restrições de acordo com o Anexo IV da IN SDA 25/2009, conforme apresentado na Quadro 2.

**Quadro 2.** Restrições de uso para fertilizantes orgânicos

Fertilizante orgânico	Restrição de uso
Classe D	<p>Aplicação somente por meio de equipamentos mecanizados. Durante o manuseio e aplicação, deverão ser utilizados equipamentos de proteção individual (EPI);</p> <p>Uso proibido em pastagens e cultivos de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo.</p>

Fonte: Instrução Normativa SDA/MAPA 25/2009

Ainda conforme está IN SDA, para que um composto orgânico possa ser utilizado comercialmente como fertilizante ele deve apresentar, no mínimo 15% de carbono orgânico, 1% de nitrogênio total, 18:1 de relação C:N, 20:1 de relação CTC:C e 6,0 de valor de pH, além de limite máximo de umidade (50%) e de baixa contaminação com parasitos, indicadores de microrganismos enteropatogênicos e metais tóxicos.

Neste sentido, Leite (2015) expõe que simultaneamente às discussões da IN SDA 27/2006, aconteceu a constituição de um grupo técnico de trabalho de responsabilidade do CONAMA, com o objetivo de discutir e normatizar o uso do lodo de esgoto sanitário na agricultura em consenso com o MAPA, deste modo, foi criada pelo CONAMA a Resolução N° 375/06.

### **3.12. Parâmetros agrônômicos – fertilizantes/compostos orgânicos**

#### **3.12.1. Macro e Micronutrientes**

Os elementos essenciais às plantas são divididos em dois grandes grupos, dependendo das quantidades exigidas pelas plantas: os macronutrientes representado por N, P, K, Ca, Mg e S e os micronutrientes representados por B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn.

A legislação brasileira referente a fertilizantes e corretivos, subdivide os macronutrientes em duas categorias: macronutrientes primários N, P, K e macronutrientes secundários Ca, Mg e S.

De acordo com PRIMO *et. al.* (2010), em nutrição de plantas, os teores de macronutrientes são, em geral, dados como porcentagem (%) da forma elementar, podendo, dependendo da finalidade, aparecerem como equivalente miligrama (mg). Neste aspecto, comumente, a concentração dos microrganismos é fornecida em parte por milhão (ppm) a exemplo da liberação dada em  $\text{mg.kg}^{-1}$ .

Contudo, conforme Andreoli *et. al.* (1999), o interesse agrícola para a utilização do lodo de esgoto sanitário na forma composto orgânico está no fato de proporcionar o condicionamento de solos, melhorando as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, visto que são providos de elementos necessários, mas não suficientes à nutrição de plantas. Segundo os autores, este composto orgânico, apresentam grande potencial agrícola devido serem ricos em matéria orgânica e nutrientes utilizados pelas plantas e microrganismos do solo.

### **3.12.2. Contaminantes inorgânicos**

Uma das restrições ao uso de resíduos orgânicos com potencial de contaminação em solos agrícolas são os teores de contaminantes inorgânicos nestes resíduos.

A definição do destino final do lodo de esgoto sanitário tem-se apresentado como um desafio para a sociedade. Uma das alternativas é a utilização agrícola do lodo, como fonte de matéria orgânica para o solo e de nutrientes para plantas. Entretanto, a presença de elementos inorgânicos contaminantes pode restringir a aplicação do lodo no solo, pois, à medida que ocorre o acúmulo desses elementos no solo, pode ocorrer maior absorção deles pelas raízes das plantas, translocação para a parte aérea, acúmulo nas partes comestíveis, e, conseqüentemente, provocar entrada dos contaminantes na cadeia alimentar (TREVIZAM, *et. al.*, 2005).

Ainda conforme os autores, os elementos potencialmente contaminantes comumente encontrados no lodo de esgoto são: Pb, Ni, Cd, Cr, Cu e Zn, que ao longo do tempo podem comprometer a sustentabilidade do ambiente, pois o uso prolongado de lodo ou composto de lodo contendo contaminantes inorgânicos pode elevar ao acúmulo destes elementos no solo, sendo capaz ainda de vir a contaminar a cadeia alimentar e causar a redução da produção de culturas agrícolas.

### 3.12.3. Carbono orgânico

O carbono, em geral, é o elemento com maior concentração em lodo de esgoto, o que evidencia a participação expressiva da fração orgânica na massa seca total, com teores de matéria orgânica entre 18 a 50% (ANDRADE, *et. al.*, 2011). Conforme os autores, em função dessa fração orgânica do lodo, seu uso agrícola como condicionador de solos tem sido recomendado, principalmente pela possibilidade de manutenção ou aumento do teor de carbono edáfico.

Segundo Andrade, *et. al.*, (2011), a manutenção ou o aumento do carbono do solo em função da aplicação do lodo dependerá do balanço entre o aporte e perdas de carbono, estas últimas principalmente na forma de dióxido de carbono, devido a decomposição da fração orgânica do resíduo.

Ainda há de se levar em consideração além desse balanço, o efeito indireto do lodo afetando a produção de fitomassa da cultura, também deve representar entrada importante de C no sistema, mas, sem dúvida, a compreensão da biodegradação do lodo é um passo inicial para o melhor manejo da matéria orgânica de solos tratados (ANDRADE, *et. al.*, 2011).

### 3.12.4. Sólidos Totais

Em uma amostra úmida de lodo de esgoto, os Sólidos Totais (ST), são os resíduos que permanecem quando o lodo de esgoto é seco em estufa à temperatura de 103 a 105 °C (USEPA, 2004).

Correia (2009), expõe que os sólidos totais juntamente com os sólidos voláteis, podem ser parâmetros utilizados para monitorar o grau de estabilização da matéria orgânica e conseqüentemente o grau de putrefação do lodo. Assim, conforme a Resolução Nº 375/06 do CONAMA, se a relação entre sólidos totais e sólidos voláteis for inferior a 70% o lodo é considerado estável.

### 3.12.5. Sólidos Fixos

Os Sólidos Fixos (SF), correspondem resíduos (cinzas) que permanecem, após o lodo seco em estufa a 103 a 105° C, ser calcinado a 550° C em forno mufla.

Cabe salientar que os sólidos fixos, podem ser usados para avaliar as condições de estabilização do lodo de esgoto, fixado como patamar mínimo para utilização agrícola em 30%, pois mesmo com essa porcentagem, pode ocorrer problemas com odores.

### 3.12.6. Sólidos Voláteis

Os Sólidos Voláteis (SV), conforme a Norma USEPA (2004), correspondem a quantidade de sólidos totais suprimida no lodo de esgoto quando esse sofre combustão à temperatura de 550° C, ou seja, corresponde ao material orgânico volatilizado.

### 3.12.7. Capacidade de Troca Catiônica

A Capacidade de Troca Cátions (CTC), corresponde à soma das cargas negativas nas partículas microscópicas da matéria orgânica, retendo os cátions, tais como Cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnésio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), Potássio ( $\text{K}^+$ ), Sódio ( $\text{Na}^+$ ), Alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ) e Hidrogênio ( $\text{H}^+$ ).

A importância da CTC refere-se não só a retenção de cátions, mas como também de água, além de ter direta relação com a estruturação e consistência composto.

### 3.12.8. Capacidade de Retenção de Água

A Capacidade de Retenção de Água (CRA), representa a capacidade de armazenamento de água que o composto possui, sendo baseada na relação entre a sucção e umidade volumétrica.

A retenção de água proporciona observar o provável comportamento do composto não saturado conforme é submetido ao aumento da sucção, ou seja, o secamento do composto quanto ao aumento das forças matriciais do composto.

Assim, a retenção da água ocorre em função da estrutura nos baixos valores potenciais condicionado pela frequência de macro e micro poros e pela granulometria e mineralogia das partículas nas elevadas tensões.

### 3.12.9. pH em $\text{CaCl}_2$

O potencial hidrogeniônico (pH) em solução de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) a 0,01 mol.L<sup>-1</sup>, foi introduzido por Schofield e Tylor (1995) *apud* Rossa (2006).

A determinação do pH em  $\text{CaCl}_2$ , apresenta algumas vantagens em relação à determinação do pH em água, conforme descrito por Peech (1965) *apud* Rossa (2006).

a) o pH em  $\text{CaCl}_2$  é pouco afetado pela relação entre terra/composto e solução;

b) a concentração salina de 0,01 mol.L<sup>-1</sup> é suficiente para padronizar as variações de sais entre amostras, evitando-se assim as variações estacionais de pH;

c) a suspensão de solo em  $\text{CaCl}_2$  é floculada, o que minimiza os erros provenientes do potencial de junção líquida, uma vez que o eletrodo de referência permanece num sobrenadante isento de partículas de solo/composto;

d) a concentração salina utilizada é semelhante à concentração de sais observada em solução de solo/composto de boa fertilidade. E o  $\text{Ca}^{2+}$  é normalmente o íon mais abundante em solos. Por essas razões, o pH em  $\text{CaCl}_2$  representa a atividade do íon  $\text{H}^+$ , mais próxima daquela que existe no ambiente radicular das plantas.

e) destaca-se também a vantagem da precisão e estabilidade do aparelho de leitura.

### **3.12.10. Condutividade elétrica e índice salino**

Uma recente alteração na legislação do MAPA sobre fertilizantes e compostos inclui a determinação de índice salino, bem como a determinação da condutividade elétrica.

O índice salino (IS) do fertilizante ou composto, é o valor que indica o aumento da pressão osmótica produzida por um determinado fertilizante ou composto quando aplicado no solo em comparação com o nitrato de sódio ( $\text{NaNO}_3$ ), sendo a referência do  $\text{NaNO}_3$  com  $\text{IS}=100$ .

Tal medida visa prevenir, que alguns fertilizantes ou compostos que apresentam alto índice salino, não propiciem o aumento da salinização do solo. Uma das maneiras de se medir a salinidade dos substratos e do solo consiste na determinação da condutividade elétrica (C.E.), em que se mede a concentração de íons em uma solução água/solo, ou água/composto.

---

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1. Considerações iniciais**

Este item aborda sequencialmente duas etapas distintas do desenvolvimento deste estudo. Na primeira etapa, será apresentado o projeto preliminar em teste de bancada que teve como finalidade verificar a viabilidade de reprodução do processo de compostagem em escala reduzida do lodo de esgoto sanitário gerado em reatores UASB.

Na segunda etapa, será apresentado o projeto em escala real, que teve a finalidade de verificar a eficiência de inóculo comercial no processo de compostagem de lodo de esgoto sanitário gerado em reatores UASB e a avaliação do composto orgânico obtido.

Ressalta-se que a execução e estudo do projeto em escala real ocorreu em local diferente ao da aplicação do projeto preliminar. Tal fato ocorreu em virtude de necessidades como infraestrutura adequada, área, maquinário, estufas, laboratórios, equipamentos de monitoramento das variáveis do processo de compostagem, EPI's, facilidade de aquisição, transporte e armazenamento de material (lodo de esgoto e casca de eucalipto) e equipe de apoio.

Diante o exposto, o projeto preliminar foi desenvolvido na cidade de São Carlos-SP, enquanto que posteriormente o projeto em escala real foi desenvolvido na cidade de Botucatu-SP. Ambos os projetos (preliminar e em escala real) serão abordados nos itens e subitens seguintes.

### **4.2. Considerações gerais do projeto preliminar (primeira etapa)**

A execução do projeto preliminar ocorreu em São Carlos-SP, no laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Civil (DECiv) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

O lodo de esgoto sanitário utilizado foi o proveniente da ETE-Monjolinho, característico de um sistema de tratamento por reator UASB, apresentando 75% de umidade após centrifugado.



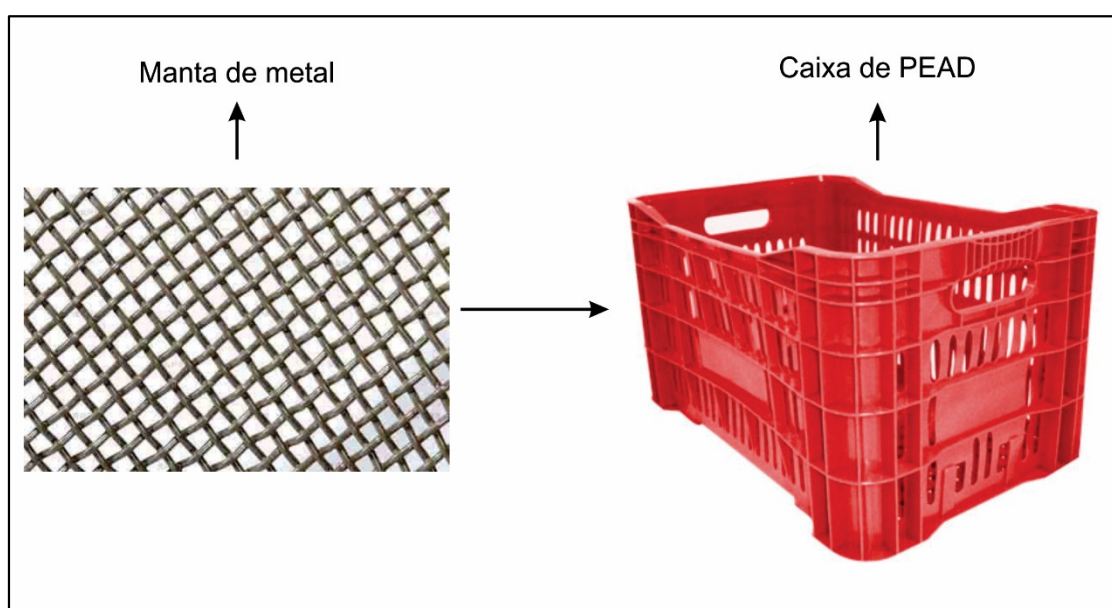
### 4.2.1. Montagem do projeto preliminar

A montagem do projeto preliminar compreendeu a utilização de uma caixa plástica com volume de 46 L, confeccionada em polietileno de alta densidade (PEAD), com dimensões internas de 51,5 cm de largura, por 32 cm de comprimento e 28 cm de altura. Esta caixa foi revestida internamente com malha de metal, bem similar a uma tela do tipo mosquiteiro.

A manta de metal foi utilizada com o objetivo de evitar o processo de anaerobiose e para impedir que o material em processo de degradação saísse pelas aberturas da caixa durante os períodos de revolvimento e mistura do material.

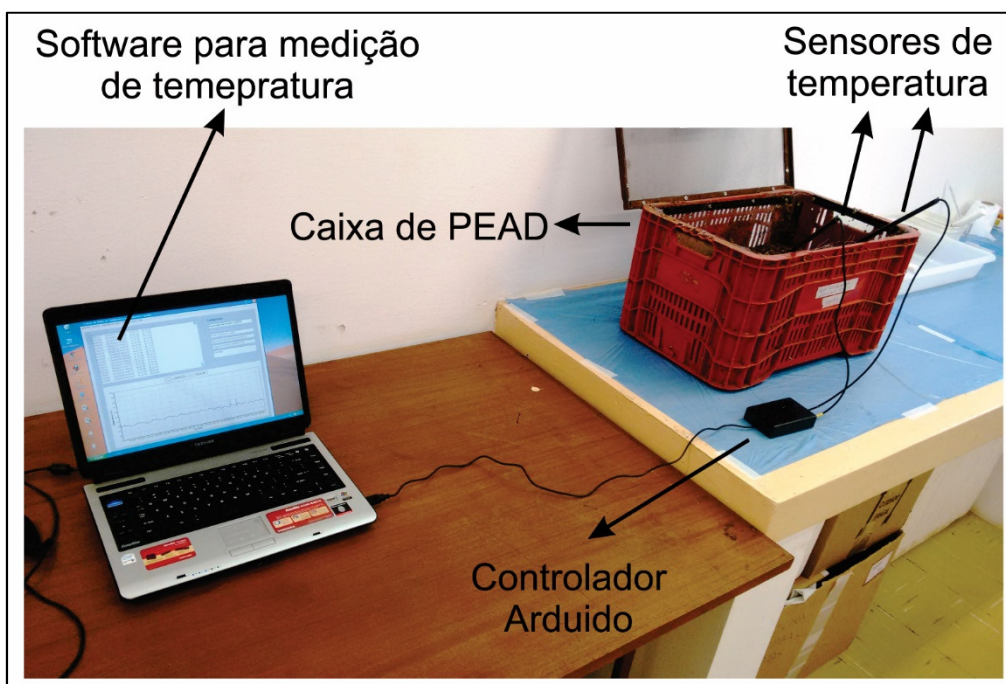
Também se utilizou um sensor de temperatura desenvolvido com tecnologia Arduíno e um algoritmo para representação gráfica das leituras de temperaturas e registro em arquivo texto. As Figuras 13 e 14 apresentam respectivamente o esquema de montagem da caixa de PEAD com a malha e o projeto preliminar para teste de bancada montado.

**Figura 13.** Esquema da montagem da caixa de PEAD com malha de metal



Fonte: Autor (2016)

**Figura 14.** Projeto preliminar montado para teste de bancada



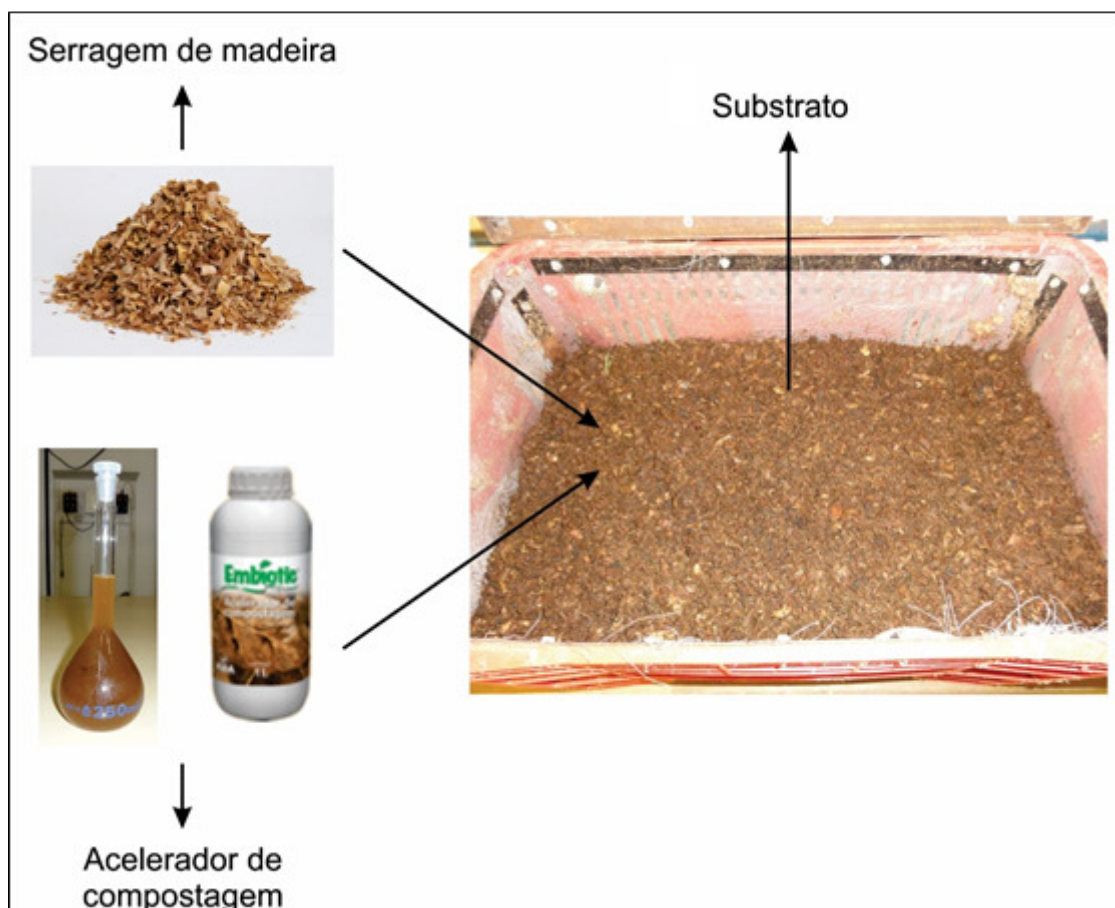
Fonte: Autor (2016)

#### **4.2.2. Preparo do substrato para o processo de compostagem**

Utilizou-se um substrato preparado e fornecido a caráter de pesquisa pela Korin Meio Ambiente (KMA), como apresentado na Figura 15. Este substrato foi formulado com 95% de serragem de madeira e outras fontes de carbono de origem vegetal, e 5% de inóculo comercial. O inóculo comercial utilizado na preparação do substrato foi o acelerador de compostagem da Embiotic®-Line, também fornecido a caráter de pesquisa pela KMA.

Conforme informações obtidas na KMA, este substrato favorece o processo de degradação da matéria orgânica, sendo indicado para o tratamento de resíduos orgânicos de diferentes características. Este processo ocorre pela formação induzida de microrganismos termofílicos que possibilitam a degradação e higienização devido as altas temperaturas em curto prazo, cerca de 24 a 72 horas. A Figura 15, apresenta o esquema da composição do substrato.

Figura 15. Esquema da composição do substrato



Fonte: Autor (2016)

### 4.2.3. Coleta do lodo de esgoto sanitário

O lodo de esgoto sanitário utilizado foi obtido na Estação de Tratamento de Esgoto Monjolinho (ETE-Monjolinho) (Figura 16), localizada na área correspondente ao antigo sítio Santa Adelaide, situado à estrada municipal Cônego Washington José Pera e às margens do Rio Monjolinho, o qual é um dos principais rios de São Carlos. A estação é gerenciada pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de São Carlos e possui uma área total de 20.000 m<sup>2</sup>.

**Figura 16.** Estação de tratamento de esgoto Monjolinho (ETE-Monjolinho)



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2016)

O lodo é característico de um sistema de tratamento anaeróbio, gerado em reatores UASB e apresenta após o processo de desaguamento efetuado por centrífuga (Figura 17), teor aproximadamente de 75% de umidade.

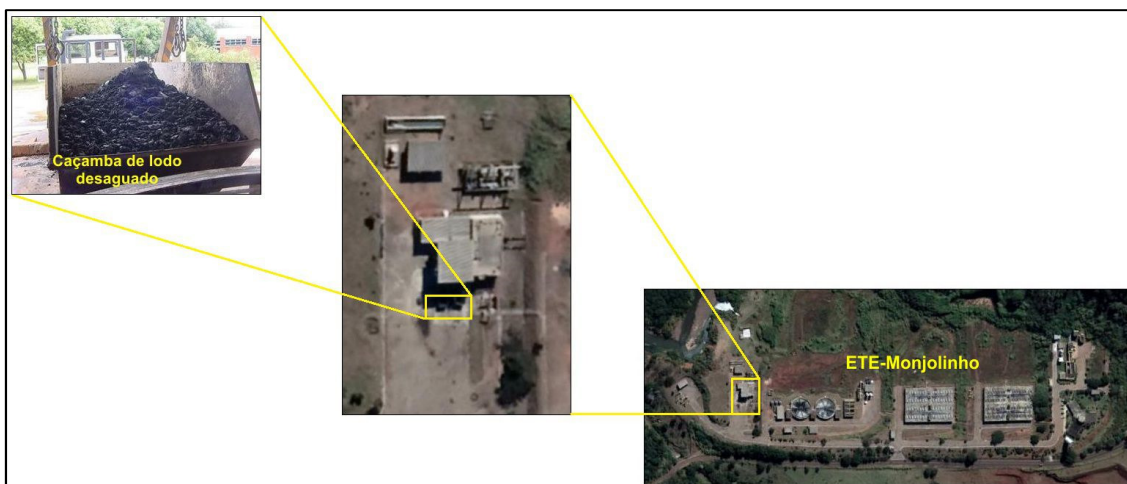
**Figura 17.** Centrífuga da ETE-Monjolinho



Fonte: (FAJARDO, 2012)

O lodo foi coletado diretamente na caçamba (Figura 18) que recebe o lodo desaguado pela centrífuga e o procedimento para coleta da amostra foi efetuado conforme o estabelecido na Norma Brasileira NBR 10007 (ABNT, 2004) da Associação de Normas Técnicas (ABNT).

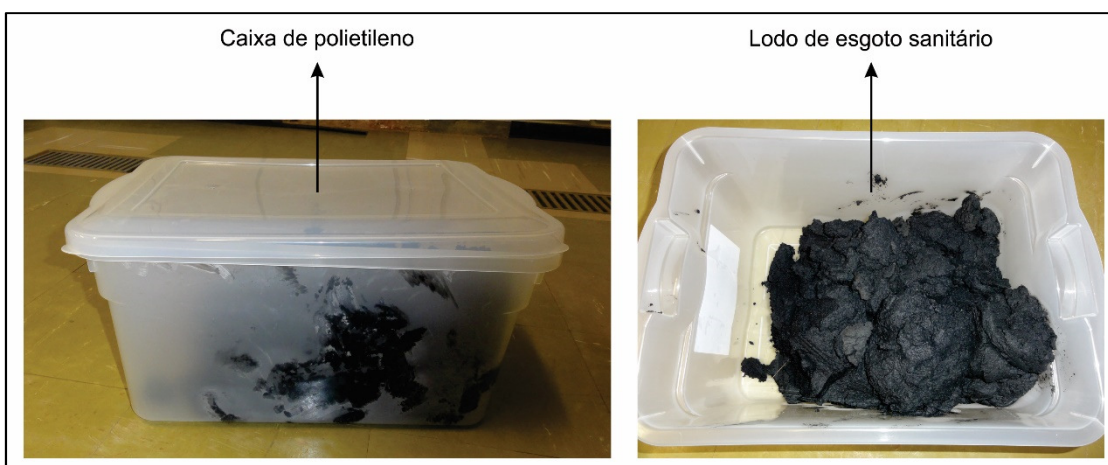
**Figura 18.** Caçamba de lodo desaguado em centrífuga (ETE-Monjolinho)



Fonte: Adaptado Google Earth (2017)

Após a coleta, o resíduo foi armazenado e transportado em caixa plástica transparente com tampa, fabricada em polipropileno. Foi utilizado caixa com tampa para minimizar o máximo possível a perda de umidade do resíduo durante o período de armazenamento. A Figura 19, ilustra a caixa de polipropileno utilizada e o lodo coletado.

**Figura 19.** Caixa plástica utilizada para armazenamento de lodo de esgoto



Fonte: Acervo pessoal (2016)

#### 4.2.4. Procedimento experimental

Após a coleta e armazenamento do lodo de esgoto e o recebimento do substrato, foram efetuadas as pesagens tanto da caixa contendo o lodo de esgoto, quanto da caixa contendo apenas o substrato, com a finalidade de comparações após o período de compostagem. Na Tabela 1, é apresentado os dados das pesagens tanto da caixa com o lodo de esgoto quanto da caixa com o substrato.

**Tabela 1.** Pesos das caixas com o lodo de esgoto e com o substrato antes do processo de compostagem

Comparativo		
Substância	Descrição	Peso total (Kg)
Lodo de esgoto sanitário	Lodo + caixa plástica de polipropileno com tampa	14,1
Substrato	Substrato + caixa PEAD	15,7

Fonte: Autor (2016)

Também foi medido a temperatura inicial e o volume do substrato com a finalidade de comparações após o período de compostagem. A Figura 20 e a Tabela 2 apresentam essas informações.

**Figura 20.** Medidas internas da caixa de PEAD



Fonte: Acervo pessoal (2016)

**Tabela 2.** Volume interno da caixa de PEAD e volume do substrato

Comparativo			
Descrição	Medidas (cm)	Temperatura (°C)	Volume (cm <sup>3</sup> )
Caixa de PEAD	Internas (51,5 x 32 x 28)	-	46,14
Substrato	Ocupado (51,5 x 32 x 18)	38,25	29,66

Fonte: Autor (2016)

Considerando as informações técnicas fornecidas pela KMA, este substrato foi preparado para receber e tratar em curto prazo, cerca de 24 a 72 horas, um volume máximo diário de 2 kg de resíduo orgânico para degradação.

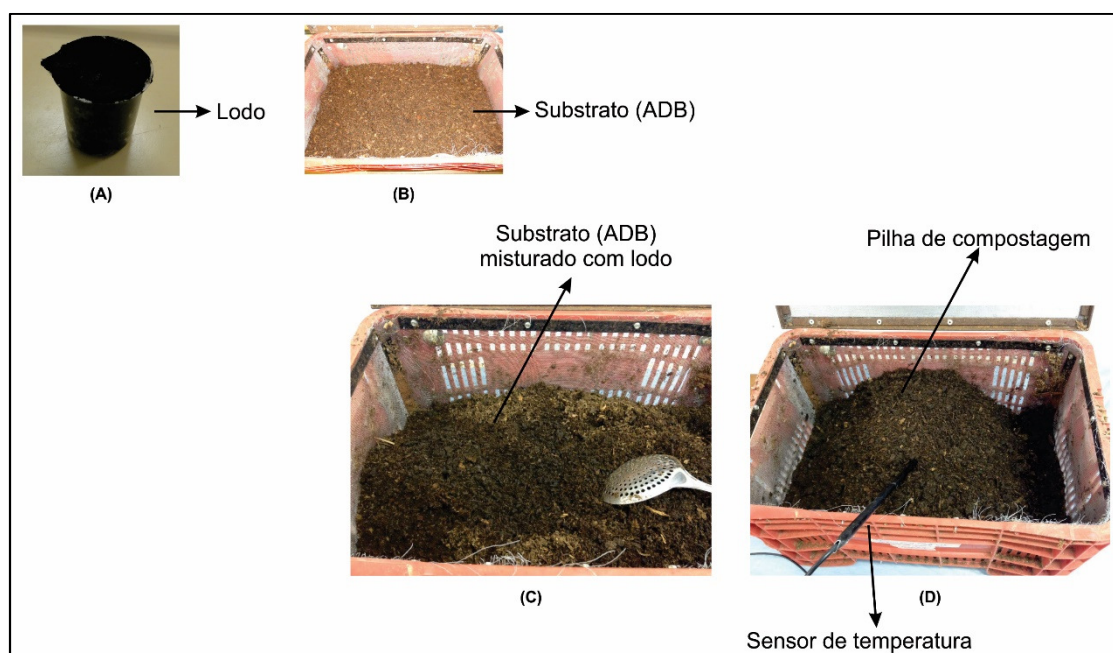
Diante destas informações, com o objetivo de verificar a viabilidade de compostagem em escala reduzida, estabeleceu-se em razão do volume coletado de lodo, acrescentar ao substrato diariamente 300 g de lodo por um período de 22 dias.

O procedimento para acrescentar o lodo de esgoto ao substrato ocorreu da seguinte forma. Diariamente o resíduo era coletado da caixa de polipropileno a qual permanecia sempre fechada para manter a umidade, com a utilização de uma colher de metal o resíduo era transferido para um béquer e logo após efetuava-se a pesagem. Todavia antes deste procedimento, a balança analítica era tarada com o peso do béquer vazio e limpo, para garantir o incremento diário de 300 g de lodo.

Após a pesagem do lodo, o resíduo era adicionado de forma fracionada ao substrato e com uma escumadeira de metal era espalhado e revolvido com o cuidado de não deixar formar torrões de lodo. Durante este procedimento, efetuava-se o revolvimento e conseqüentemente a aeração de toda a massa.

Após a mistura e revolvimento, de forma proposital formava-se uma pilha do material em processo de compostagem dentro da caixa de PEAD, objetivando-se manter a temperatura e umidade (parâmetros essenciais para a atividade dos microrganismos). A Figura 21 apresenta o acréscimo de lodo ao substrato e a formação da pilha de compostagem.

**Figura 21.** Acréscimo de lodo de esgoto ao substrato ADB e formação da pilha de compostagem



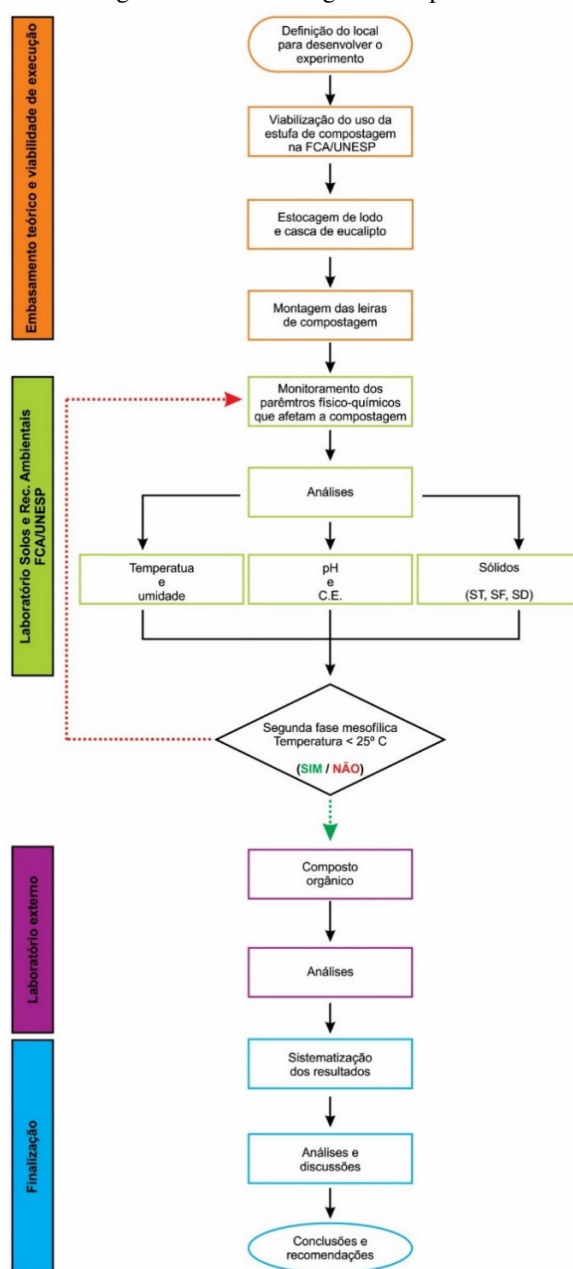
Fonte: Autor (2016)

Após a formação intencional da pilha de compostagem, os sensores de temperatura eram inseridos até o centro da pilha de compostagem para registro e monitoramento das temperaturas, conforme apresentado anteriormente pela Figura 14 que apresenta o projeto preliminar montado. Durante todo o processo de compostagem, o registro e monitoramento da temperatura ocorreu de forma ininterrupta para avaliação.

### 4.3. Considerações gerais do projeto em escala real (segunda etapa)

A execução do projeto em escala real, seguiu as etapas conforme é apresentado no fluxograma da Figura 22.

Figura 22. Fluxograma da metodologia da Etapa 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)



### 4.3.1. Estufa de compostagem

O estudo foi desenvolvido no pátio de compostagem da Estação de Tratamento de Esgoto Lageado (ETE-Lageado) da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), onde foi instalada uma estufa de compostagem (Figura 23) com as seguintes dimensões: 12,8 m (largura) x 81,0 m (comprimento) x 6,5 m (altura), correspondendo a uma área de 1.036,8 m<sup>2</sup>.

A ETE-Lageado está localizada em uma área cedida de 14 ha, dentro da Fazenda Experimental Lageado, sede da Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), da Universidade Estadual Paulista (Unesp), em Botucatu, SP.

**Figura 23.** Vista aérea da Estufa de compostagem e ETE Lageado



Fonte: (GOOGLE EARTH, 2018)

A estufa de compostagem entrou em operação em novembro de 2014, possui alicerces em alvenaria e estrutura lateral e superior em metal. A estrutura é coberta por lona plástica bem como a parede lateral esquerda, enquanto que a parede lateral direita é coberta por tela plástica tipo mosquiteira e o piso não é impermeabilizado. A Figura 24, ilustra a estufa de compostagem.

**Figura 24.** Interior da estufa de compostagem

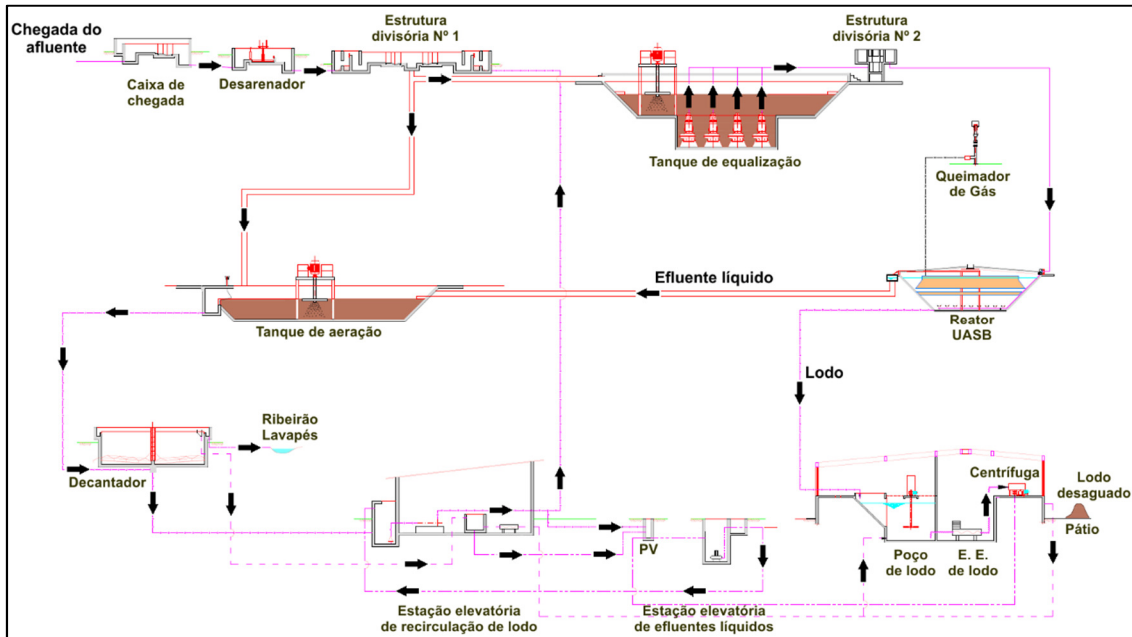


Fonte: Acervo pessoal (2017)

Atualmente, conforme informações obtidas no escritório da Sabesp localizado na ETE-Lageado, a unidade de tratamento produz em média cerca de 12 m<sup>3</sup>/dia de lodo de esgoto úmido (80% de umidade), gerado nos reatores UASB e que são encaminhados para centrifuga para o processo de desaguamento após receber polieletrólito, resultando uma geração em torno de 360 m<sup>3</sup>/mês.

Apesar da ETE-Lageado possuir o sistema de tratamento de reatores UASB seguido por tratamento por lodos ativados, a estação passou por processos de modificações. Assim o resíduo que é encaminhado para a centrifuga é o lodo gerado apenas nos reatores UASB. O sistema de tratamento por lodos ativados recebe apenas o efluente líquido dos reatores UASB e fica restrito apenas a recirculação do lodo gerado nos tanques de aeração. Nesta etapa de tratamento da ETE-Lageado, o efluente tratado do decantador é lançado no curso d'água (Ribeirão Lavapés) e o lodo acumulado nos tanques de aeração só é retirando e encaminhado para centrífuga quando em excesso. A Figura 25 apresenta o fluxograma do sistema de tratamento modificado da ETE-Lageado.

**Figura 25.** Sistema de tratamento de esgoto sanitário modificado (ETE-Lageado)



Fonte: SABESP / ETE-Lageado

O lodo de esgoto gerado nos reatores UASB após ser centrifugado é armazenado temporariamente em caçambas, quando a estação atinge o limite de 3 caçamba cheias, o lodo é transportado até o pátio de compostagem, onde segue conforme apresentado abaixo:

i) pode ser encaminhado para a estufa de desaguamento e secagem (Figura 26), adjacente esquerdo a estufa de compostagem, que utiliza o equipamento K2026 da Brako Ambiental, o qual percorre duas baias de lodo por meio de trilhos e faz o revolvimento do resíduo para secagem. Quando o resíduo está seco, no final das baias de lodo, este material é coletado por uma esteira e enviado para uma caçamba, como apresentado na Figura 27.

ii) ou pode ser encaminhado para duas outras estufas menores de armazenamento de lodo e material estruturante para compostagem (Foto 28), localizada no lado direito da estufa de compostagem, onde este material será posteriormente encaminhado para a estufa de compostagem.

**Figura 26.** Estufa de desaguamento e secagem de lodo



Fonte: Acervo pessoal (2017)

**Figura 27.** Esteira de lodo seco e caçamba de armazenamento



(a)

(b)

Fonte: Acervo pessoal (2017) / Visão de frente (a) e lateral (b)

**Figura 28.** Estufa de armazenamento de lodo e material estruturante para compostagem



Fonte: Acervo pessoal (2017)

### **4.3.2. Sistema de compostagem**

#### **4.3.2.1. Montagem da leira de compostagem**

A montagem da leira de compostagem compreendeu a utilização de 40 m<sup>3</sup> de lodo de esgoto (Figura 29), obtido do sistema de tratamento por reatores UASB da ETE-Lageado e 40 m<sup>3</sup> de casca de eucalipto (Figura 30), obtido na Empresa Eucatex, localizada em Botucatu, SP. A casca de eucalipto foi utilizada como fonte de carbono e por apresentar granulometria favorável ao processo de compostagem.

**Figura 29.** Lodo de esgoto centrifugado gerado em reatores UASB



Fonte: Acervo pessoal (2017)

**Figura 30.** Casca de eucalipto



Fonte: Acervo pessoal (2017)

#### **4.3.2.2. Proporção 1:1 (volume lodo : volume de casca de eucalipto)**

Segundo Carvalho (2002) geralmente a Relação C/N do lodo de esgoto antes do processo de compostagem situa-se numa faixa de 7 a 10/1 e conforme expõem Shammas e Wang (2007) a relação ideal para o processo de compostagem do lodo de esgoto com o material estruturante deve estar numa ordem de 25 a 30:1. Entretanto levando em consideração o exposto por Diaz e Savage (2007) em relação a complexidade para determinação do teor de carbono e alto custo do equipamento analítico, utilizou-se neste estudo a Proporção (volume lodo : volume de casca de eucalipto) em substituição a Relação C/N.

A Proporção utilizada foi de 1:1, considerando recomendações, estudos (custos e receitas) e experiências anteriores desenvolvidas pelo grupo de pesquisa do Projeto de Compostagem (Sabesp/Fapesp/Unesp) sob Coordenação do Prof. Dr. Roberto Lyra Villas-Bôas da FCA/Unesp de Botucatu, SP. A Figura 31, apresenta a mistura em proporção C/N de 1:1.

**Figura 31.** Proporção 1:1 de lodo de esgoto gerado em reatores UASB e casca de eucalipto



Fonte: Acervo pessoal (2017)

Como a Proporção utiliza volume por volume, com a finalidade de manter Proporção em 1:1, foram colocados um por vez, volume iguais de lodo de esgoto e casca de eucalipto, de modo intercalado, em caminhão caçamba (Figura 32), e posteriormente, dispostos no solo da estufa de compostagem para a formação da leira de compostagem. A Figura 33, ilustra a formação da leira de compostagem.

**Figura 32.** Mistura na Proporção 1:1 de lodo e esgoto e casca de eucalipto em caminhão caçamba



Fonte: Acervo pessoal (2017)

**Figura 33.** Formação da leira de compostagem com Proporção 1:1



Fonte: Acervo pessoal (2017)

Após toda casca de eucalipto ( $40 \text{ m}^3$ ) ser intercalada com todo o lodo de esgoto ( $40 \text{ m}^3$ ), e esse material ser depositado sequencialmente dentro da estufa de compostagem, obteve-se a formação de uma leira de compostagem de 26 m (comprimento) x 3 m (largura) x 2 m (altura), correspondendo a um volume total de  $80 \text{ m}^3$ . A Figura 34 apresenta a leira de compostagem.

**Figura 34.** Leira de compostagem recém montada



Fonte: Acervo pessoal (2017)



Apesar da leira estar constituída, a mesma ainda não se apresentava bem homogênea, considerando a misturada dos materiais, altura e largura de base da leira. Assim, foi usado um trator marca Massey Ferguson, modelo 4299, modificado pela empresa Astral Equipamento, localizada em Ribeirão Preto, SP, para trabalhar no sistema de compostagem. O trator foi montado em cima de uma estrutura elevada e rígida, atrelada a uma compostadeira, marca Astral, modelo AST-1800 Plus. A Figura 35, apresenta o trator modificado atrelado a uma compostadeira.

**Figura 35.** Trator modificado atrelado a uma compostadeira



(a) início do revolvimento; (b) durante o revolvimento  
Fonte: Acervo pessoal (2017)

A base do trator não entra em contato com o material em compostagem, apenas a compostadeira. Assim a compostadeira, possui um eixo cilíndrico horizontal e provido de lâminas (Figura 36), que ao rotacionarem efetuam o revolvimento do material.

Ao mesmo tempo em que a compostadeira efetua o revolvimento do material, a mesma por tratar-se de equipamento fechado, molda a altura e largura da leira. A Figura 37, apresenta a leira antes e depois do trator modificado atrelado a uma compostadeira passar pela e leira de compostagem.

**Figura 36.** Eixo de revolvimento da compostadeira



Fonte: Acervo pessoal (2017)

**Figura 37.** Leira antes e após a passagem do trator modificado atrelado a uma compostadeira



(a) antes da passagem da compostadeira; (b) após a passagem da compostadeira

Fonte: Acervo pessoal (2017)

### 4.3.2.3. Aeração

O processo de aeração (Figura 38) também foi realizado pelo trator modificado atrelado a uma compostadeira, no durante o processo de revolvimento da leira, levando em consideração as recomendações apresentadas por Fernandes e Silva (1999), Diaz e Savage (2007) e Cerri *et. al.* (2008), com a finalidade de evitar o processo de anaerobiose.

**Figura 38.** Processo de aeração e revolvimento da leira de compostagem



Fonte: Acervo pessoal (2017)

#### **4.3.2.4. Granulometria**

A escolha do material utilizado como estruturante e fonte de carbono, levou em consideração a granulometria do lodo de esgoto. O lodo de esgoto apresenta granulometria muito fina, o que dificulta a aeração devido à falta de espaços intersticiais entre as partículas. Considerando o exposto por Kiehl (2012) utilizou-se a casca de eucalipto (Figura 39) por apresentar granulometria que possibilita movimento de líquidos e gases na leira, favorece a aeração e mantém a temperatura sem perdas significativas de calor que prejudiquem o processo de compostagem.

**Figura 39.** Casca de eucalipto



Fonte: Acervo pessoal (2017)

### **4.3.3. Preparação do inóculo comercial**

O inóculo comercial utilizado foi o Acelerador de Compostagem de 20 L, da Embiotic®-Line, fornecido a caráter de pesquisa pela Korin Meio Ambiente (KMA) para este estudo.

De acordo com o rótulo, o produto deve ser ativado antes da sua utilização, sendo a solução ativa para uso, obtida da seguinte forma. Para se fazer uma solução ativa de 10 L, usou-se 1 kg de carboidrato (que pode ser açúcar mascavo, demerara ou cristal), que serve como fonte de carbono para os microrganismos presentes no inóculo comercial. Neste estudo foi usado 1 kg de açúcar cristal, 8 litros de água desclorada e 1 litro do inóculo comercial da Embiotic®-Line. Deste modo foi obtido durante todo o processo de compostagem 200 L de solução ativa.

Todos estes ingredientes foram misturados e a solução correspondente ficou descansando em bombona plástica de 20 L, fechada e sem a presença de ar por sete dias consecutivos, tempo solicitado pelo fabricante para que a solução se torne ativa.

As soluções foram preparadas de modo a atender cada revolvimento da leira de compostagem, a cada revolvimento estabelecido a solução já estava no seu sétimo dia do início da ativação da solução. Assim a ativação da solução sempre era iniciada sete dias antes de cada revolvimento da leira para inoculação.

#### **4.3.3.1. Aplicação do inóculo comercial**

A aplicação do inóculo comercial ocorreu da seguinte forma, primeiramente a leira de compostagem formada de 26 m de comprimento foi dividida em duas partes iguais de 13 m (comprimento) x 3 m (largura) x 2 m (altura).

Após a divisão da leira, apenas uma das partes recebeu a aplicação do inóculo comercial desde o início até o final do processo de compostagem, a outra metade que não recebeu o inóculo comercial foi usada como controle para fins de comparação durante todo o processo de compostagem.

Antes de cada revolvimento da leira de compostagem, efetuada pelo trator modificado atrelado a uma compostadeira, eram aplicados 40 L de solução ativa do inóculo comercial, por meio de um regador de jardim. A rega foi feita uniformemente por toda a leira, desde a base até o topo. Neste sentido, cada metro cúbico da massa em compostagem recebeu 1 litro de solução ativa, o que é suficiente para o processo de compostagem, conforme instruções fornecidas pela KMA.

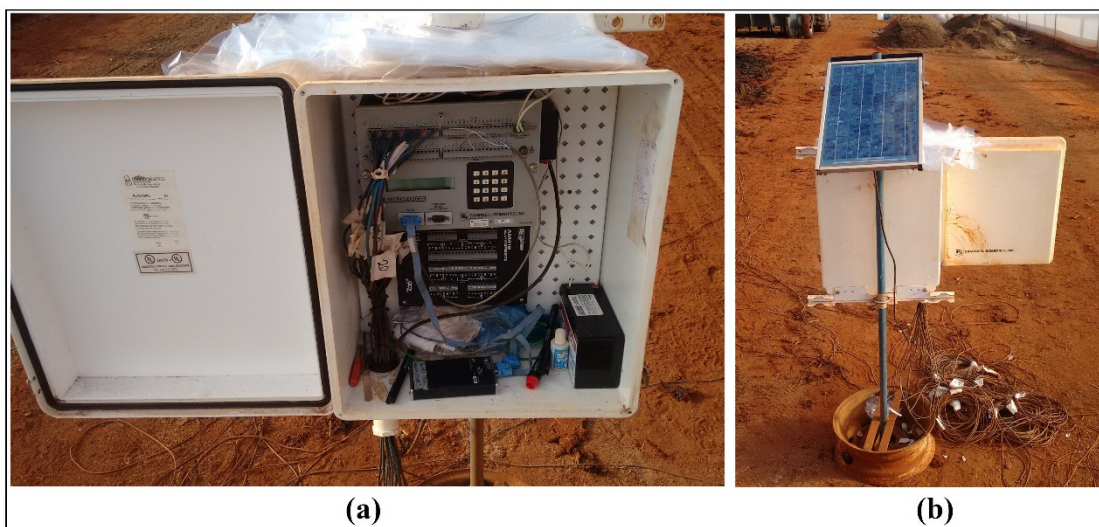
Após a rega, tanto a parte que recebeu a aplicação do inóculo comercial quanto a parte controle eram revolvidas no mesmo dia e horário. Neste estudo foi estabelecido efetuar os revolvimentos sempre que a temperatura e umidade da leira se apresentava acima de 45° C e 50% respectivamente.

#### 4.3.4. Monitoramento da temperatura

O monitoramento e registro automatizado das temperaturas nas duas partes da leira de compostagem foi realizado com um Micrologger para aquisição de dados, marca Campbell Scientific, modelo CR23X (Figura 40) com Storage Module e 20 termopares (sensores de temperatura).

Contudo, para o Micrologger ficar operando continuamente, sem interrupção por falta de energia, foi utilizado um painel solar fotovoltaico e uma bateria de 12 v de motocicleta que serviu como nobreak para os períodos noturnos, dias nublados ou de chuva.

**Figura 40.** Micrologger Campbell Scientific - CR23X



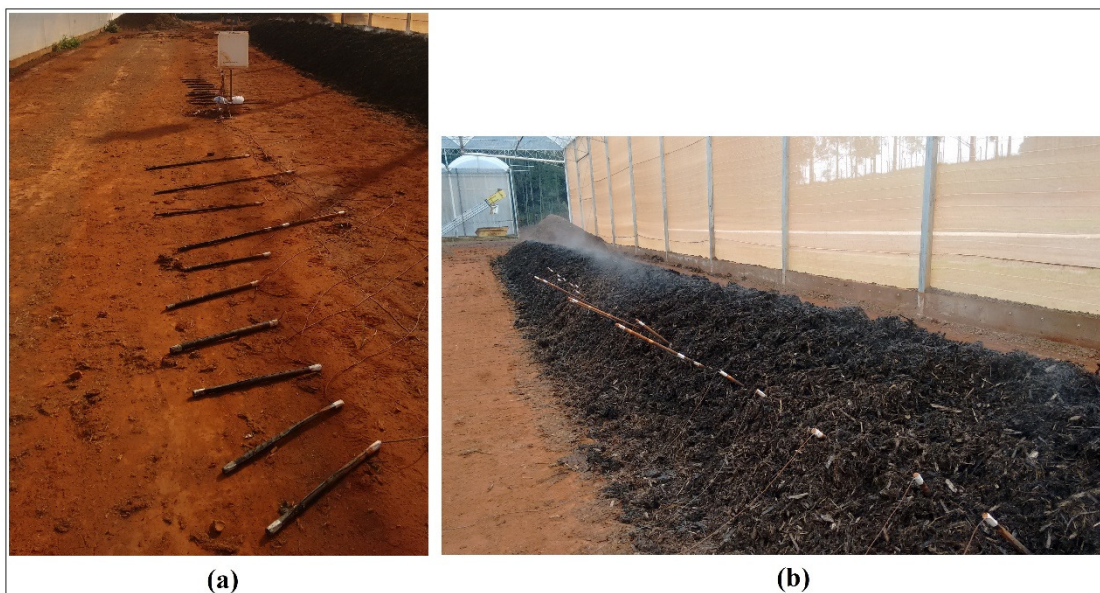
(a) micrologger, storage module, bateria 12V; (b) painel solar fotovoltaico  
Fonte: Acervo pessoal (2017)

Os termopares (Figura 41), foram ligados ao micrologger e inseridos na leira de compostagem distando um do outro cerca de 1 m, cada termopar foi posicionado de modo que ficasse na metade da altura da pilha de compostagem e foi inserido até o centro da pilha. Foram utilizados 10 termopares na leira que recebeu a aplicação do inóculo comercial e 10 termopares na leira controle que não recebeu a aplicação.

O registro das temperaturas efetuadas pelo micrologger foram armazenadas no storage module a cada 30 min no padrão dynamic address translation (.dat), a qual é uma extensão possível de ser editada em qualquer editor de texto.

Utilizou-se neste estudo o micrologger, pelo fato de fornecer um registro completo, como ano, dias julianos, horário e temperatura, o que facilitou a interpretação das aquisições de dados.

**Figura 41.** Termopares para medição de temperatura



(a) termopares fora da leira de compostagem; (b) termopares na leira de compostagem  
Fonte: Acervo pessoal (2017)

Cada termopar era retirado da leira de compostagem antes de cada nova aplicação do inóculo comercial e após o revolvimento da leira de compostagem eram recolocados na mesma posição, pois cada posição foi identificada no micrologger, sequencialmente de 1 a 20, com o objetivo de monitorar a evolução da temperatura em cada ponto de monitoramento da leira.

#### **4.3.5. Tempo de compostagem e revolvimentos**

Este experimento, teve um processo de compostagem total de 45 dias consecutivos, iniciando-se em 10 de agosto de 2017 e terminando em 25 de setembro de 2017.

Durante esse período de tempo, a leira foi revolvida 11 vezes, considerando e avaliando a temperatura e a umidade, sendo os revolvimentos realizados em:

- 10, 14, 16, 18, 21, 24, 28, 31 (agosto);
- 04, 11, 18 (setembro).

As amostras eram coletadas logo após cada revolvimento, e para tal, seguiu-se o estabelecido na Norma NBR 10007/2004, a qual fixa os requisitos exigíveis para amostragem de resíduos sólidos.

O número de amostras por revolvimento foi de 20, sendo uma amostra obtida de cada região ao redor de cada termopar com o objetivo de acompanhar além da temperatura em cada parte da leira, o comportamento do teor umidade, teores de sólidos (ST, SF e SV), pH e condutividade.

#### 4.3.6. Amostragens e análises

As amostras, cerca de 150 g, foram coletadas no ponto de cada termopar e acondicionadas em sacos plásticos (Figura 42).

Após a coleta, as amostras foram transportadas em caixa de poliestireno (isopor), até o Laboratório de Solos e Recursos Ambientais da FCA/Unesp, e até o momento das análises foram mantidas sob refrigeração.

As análises efetuadas compreenderam a obtenção do teor de umidade, teor de sólidos totais (ST), teor de sólidos voláteis (SV) e teor de sólidos fixos (SF), potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (C.E.). A seguir, será apresentado os procedimentos adotados para cada análise.

**Figura 42.** Amostras de composto obtidas nos pontos dos termopares na leira de compostagem



Fonte: Acervo pessoal (2017)

## Série sólidos

Para a determinação da série sólidos (totais, fixos e voláteis), para cada método de determinação, foi utilizado a Norma NBR 10664/1989, Águas – Determinação de Resíduos (Sólidos) – Método Gravimétrico.

- **Sólidos Totais**

A determinação de Sólidos Totais (ST) foi obtida por meio do Método J – Resíduo total (sólidos totais) – Modificados para lodos e sedimentos conforme a NBR 10644/1989.

Assim, primeiramente preparou-se as cápsulas de porcelanas. As capsulas foram colocadas em forno mufla a  $(550 \pm 50)$  °C por 1h. Após esse tempo, as capsulas foram esfriadas no dessecador até alcançarem a temperatura ambiente. Logo após cada capsula foi pesada com precisão aproximada de 10 mg e deixada no dessecador até o momento do uso.

Cada amostra foi transferida respectivamente para cada capsula (o peso das amostras variou entre 25 a 50 g), e pesadas com precisão de 10 mg.

Como as amostras se enquadram como amostra sólida, conforme a NBR 10664/1989, as amostras foram secas em estufa a 103° C por 12h, onde após esse tempo foram esfriadas em dessecador até a temperatura ambiente e pesadas com precisão de 10 mg. O teor de sólidos totais, foi obtido pela seguinte expressão:

$$\% \text{ resíduo total} = \frac{m2 \times 100}{m1}$$

Onde:

m2 = massa do resíduo total, em g;

m1 = massa da amostra, em g.

Conseqüentemente, por meio do resultado (% resíduo total), conforme o Método J, foi possível determinar o teor de umidade, a qual foi obtida pela seguinte expressão:

$$\text{Teor de umidade} = 1 - (\% \text{ teor de sólidos})$$



- **Sólidos Fixos**

A determinação de Sólidos Fixos (SF), foi obtida por meio do Método L – Resíduo fixo (sólidos fixos) – Modificados para lodos e sedimentos conforme a NBR 10644/1989.

Os resíduos, obtidos conforme o Método J, foram submetidos à calcinação a (550 ±50) °C por 1 h, e logo após foram esfriados até a temperatura ambiente em dessecador e pesados com precisão de 10 mg. O teor de sólidos fixos, foi obtido pela seguinte expressão:

$$\% \text{ resíduo fixo} = \frac{m_3 \times 100}{m_2}$$

Onde:

$m_3$  = massa do resíduo fixo, em g;

$m_2$  = massa do resíduo total, em g.

- **Sólidos voláteis**

A determinação de Sólidos Voláteis (SV), foi obtida por meio do Método M – Resíduo volátil (sólidos voláteis) – Modificados para lodos e sedimentos conforme a NBR 10644/1989.

O teor de sólidos voláteis, consequentemente é obtido pela diferença entre os valores do teor de sólidos totais e teor de sólidos fixos.

Assim, o teor de sólidos voláteis, foi obtido pela seguinte expressão:

$$\% \text{ resíduo volátil} = \frac{(m_2 - m_3) \times 100}{m_2}$$

Onde:

$m_2$  = massa do resíduo total, em g;

$m_3$  = massa do resíduo fixo, em g.

- **Potencial hidrogeniônico (pH)**

O pH foi medido, conforme instruções apresentadas na Norma NBR 7353/2014 (Soluções aquosas – Determinação do pH com eletrodos de vidro), mas considerando o Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Neste contexto, considerando o composto como fertilizante orgânico, as leituras de pH foram realizadas suspendendo as amostras em solução de Cloreto de Cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) na concentração de  $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$ . Para tanto, pesou-se  $10\text{g} (\pm 1 \text{ mg})$  de cada amostra “**in natura**” e transferiu-se para béqueres de 100 mL. Logo após foi adicionado 50 mL de solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$  e efetuou-se a homogeneização.

Após a homogeneização, esta solução de amostra e  $\text{CaCl}_2$  ficou descansando por 30 minutos, onde de 10 em 10 minutos efetuou-se a agitação deste material. Em seguida, foram feitas as leituras dos pH, expressando o resultado com a indicação de "pH em solução de  $\text{CaCl}_2$  a  $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$ ".

- **Condutividade elétrica (C.E.)**

A condutividade elétrica foi medida conforme instruções apresentadas na Norma NBR 14340/1999, Água – Determinação da condutividade e da resistividade elétrica, mas considerando o Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Pesou-se 10 g de cada amostra, com precisão de 0,1 mg, e transferiu-se para béqueres de 200 mL. Logo após foi adicionado 100 mL de água deionizada e efetuou-se a homogeneização.

Após a homogeneização, esta solução de amostra e água deionizada ficou em repouso por 10 minutos. Em seguida, procedeu-se com as leituras de condutividade elétrica.

- **Análises para fertilizantes orgânicos**

Neste estudo, após o final do processo de compostagem (por meio da obtenção do composto já estabilizado e higienizado, possuindo características de composto orgânico) foram feitas análises de âmbito agrônômico para fertilizantes orgânicos, de acordo com as exigências estabelecidas pelo MAPA.

Para isso, foi coletado uma amostra de 1kg do composto que recebeu a inoculação do acelerado de compostagem Embiotic®-Line e 1 kg do composto controle que não recebeu a inoculação (controle).

Ambas as amostras foram coletadas, e armazenadas conforme instruções apresentadas na Norma NBR 10007/2004 e encaminhadas para análise ao Laboratório LaborSolo®, em Londrina, PR.

Os resultados das análises constam em Anexo e são identificadas como Amostra S/AC (sem acelerador de compostagem) e Amostra C/AC (com acelerador de compostagem).

Fez-se a análise completa para fertilizantes orgânicos, para avaliação de viabilidade de uso e comparação entre as amostras. As análises realizadas foram:

- **Caracterização agronômica:** Determinação de macronutrientes (nitrogênio total, fósforo total, potássio solúvel, cálcio total, magnésio total e enxofre total) e micronutrientes (boro total, cloro solúvel, cobre total, ferro total, manganês total, molibdênio total, sódio total, níquel total e zinco total);
- **Contaminantes inorgânicos:** Determinação de cádmio total, chumbo total, cromo total e cobalto total.
- **Caracterização complementar:** Determinação de carbono orgânico, carbono total, umidade perdida a 65 e 110° C, sólidos totais fixos a 110 e 550° C e sólidos voláteis totais.
- **Relações agronômicas:** Capacidade de Troca de Cátions (CTC), Capacidade de Retenção de Água (CRA), Relação Carbono Orgânico/Nitrogênio (C.O./N) e Relação Capacidade de Troca de Cátions/Carbono (CTC/C).
- **Parâmetros físico-químicos:** pH em CaCl<sub>2</sub>, Condutividade elétrica (C.E.), Índice Salino e Densidade.

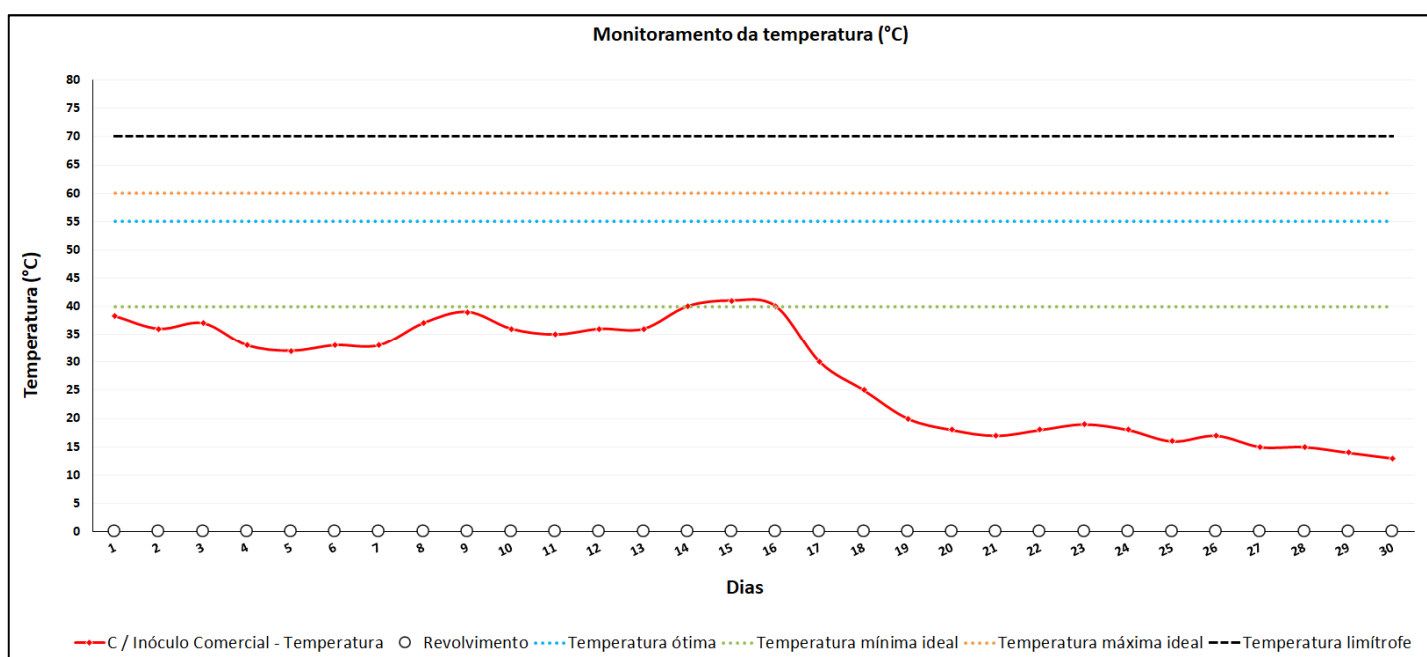
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, serão apresentados os resultados e discussões tanto para o projeto preliminar quanto para o projeto aplicado em escala real, conforme os subitens a seguir.

### 5.1. PROJETO PRELIMINAR

O estudo do projeto preliminar avaliou a oscilação da temperatura no processo de compostagem realizado em escala reduzida. A temperatura foi utilizada como parâmetro decisório no processo, uma vez que está diretamente ligada as atividades dos microrganismos durante a degradação da matéria orgânica. Como exposto por Depledge (2013) a atividade dos microrganismos gera calor, aumentando a temperatura do composto e conforme Pereira Neto (2007) é um indicativo de equilíbrio biológico, de fácil monitoramento que reflete a eficiência do processo. O Gráfico 1 apresenta a oscilação da temperatura durante o processo de compostagem do lodo de esgoto gerado em reatores UASB em escala reduzida.

**Gráfico 1.** Monitoramento da temperatura no processo de compostagem em escala reduzida do lodo gerado em reatores UASB da ETE-Monjolinho



Fonte: Acervo pessoal (2016)

Como pode ser observado no Gráfico 1, a temperatura permaneceu predominantemente no processo de compostagem abaixo da faixa de temperatura de 40° C, prejudicando o processo de compostagem. Kiehl (2012) apresenta em seus estudos que temperaturas abaixo de 40° C e acima de 60° C é um indicativo de ecossistema em

desiquilíbrio que interfere negativamente no processo de compostagem, resultando em um processo malsucedido.

Rodrigues (2004) e Massukado (2008) expõem em suas pesquisas que a compostagem em escala reduzida apresenta influência direta na temperatura e umidade, pois permite a rápida dissipação de calor e umidade, prejudicando o sistema de compostagem, deste modo, conforme o boletim de pesquisa e desenvolvimento da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2004) e estudo desenvolvido por Sunada (2014), recomenda-se a montagem de pilhas de compostagem com volume mínimo de 1,5 m<sup>3</sup> para que após o período de decomposição inicial a pilha de compostagem continue apresentando um volume superior a 0,70 m<sup>3</sup> para que não ocorra comprometimento do sistema em relação a perda de calor e umidade.

A importância da elevação da temperatura como exposto por Insam e Bertoldi (2007) está no fato de higienizar e bioestabilizar do composto. No mesmo sentido, a importância da umidade está no fato de ser extremamente importante para a atividade do microrganismo e produção de novas células, uma vez que a estrutura dos microrganismos é composta por 90% por água.

Em relação a temperatura, diante o exposto e pela avaliação gráfica da oscilação da temperatura, o processo de compostagem em escala reduzida (volume menor que 1,5 m<sup>3</sup>) é inviável, pois o calor gerado pelos microrganismos é rapidamente dissipado o que impede o aumento da temperatura. Esta inviabilidade também se dá em razão das exigências estabelecidas pela Resolução CONAMA N° 481/17 em seu Anexo I, onde apresenta o período de tempo e temperatura necessária para higienização dos resíduos sólidos orgânicos durante o processo de compostagem. Sendo para sistemas abertos com temperaturas maiores que 55° C, tempo mínimo de 14 dias e para temperaturas acima de 65° C, tempo mínimo de 3 dias, já em relação a sistemas fechados, para temperaturas acima de 60° C, tempo mínimo de 3 dias.

Em relação aos pesos das caixas contendo o lodo de esgoto desaguado em reatores UABS e da caixa com substrato e que recebeu lodo para degradação durante o processo de compostagem, a Tabela 3 apresenta o valores obtidos após o período de compostagem.

**Tabela 3.** Pesos das caixas com o lodo de esgoto e com o substrato após o processo de compostagem

Antes			Após
Substância	Descrição	Peso (kg)	Peso (kg)
Lodo de esgoto	Lodo + caixa plástica	14,1	9,6
Substrato	Substrato + caixa PEAD	15,7	18,4

Fonte: Autor (2016)

Após as comparações dos pesos iniciais e finais, a caixa de armazenamento de lodo de esgoto apresentou uma redução de peso total de 4,5 kg, evidenciando a massa de lodo utilizada no processo de compostagem e acrescentada na caixa com o substrato. Entretanto a caixa com o substrato que recebeu o lodo de esgoto para degradação, apresentou um aumento de peso total de 2,7 kg, ou seja, 40% (1,8 kg) menor do que realmente recebeu (4,5 kg de lodo de esgoto).

Diante o exposto, poderia se considerar que ocorreu perda de umidade na ordem de 40% no processo de compostagem, mas pelo fato de limitação e disponibilização de recursos, o monitoramento e acompanhamento do teor de umidade não foi realizado, o que prejudicou estimar de forma mais efetiva este parâmetro.

Apesar do monitoramento do teor de umidade não ter sido efetuado, o comparativo entre os volumes ocupados na caixa com o substrato que recebeu o lodo durante o processo de compostagem apresentou uma redução significativa que pode ser usada como indicador de perda de umidade. A Tabela 4 apresenta os volumes ocupados na caixa antes e após o processo de compostagem.

**Tabela 4.** Comparativo entre os pesos e volumes antes e após o processo de compostagem

Comparativo			
Substância	Descrição	Medidas (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )
Substrato	Antes da compostagem	Ocupado (51,5 x 32 x 18)	29,66
Substrato + lodo	Após a compostagem	Ocupado (51,5 x 32 x 12,5)	20,60

Fonte: Autor (2016)

Como pode ser verificado na Tabela 4, apesar da caixa com o substrato ter recebido lodo de esgoto, no final do processo o volume total ocupado pela massa (substrato + lodo de esgoto) apresentou redução na ordem de 30%, indicando um processo de desaguamento ocorrido por meio da perda de umidade.

## 5.2. PROJETO EM ESCALA REAL

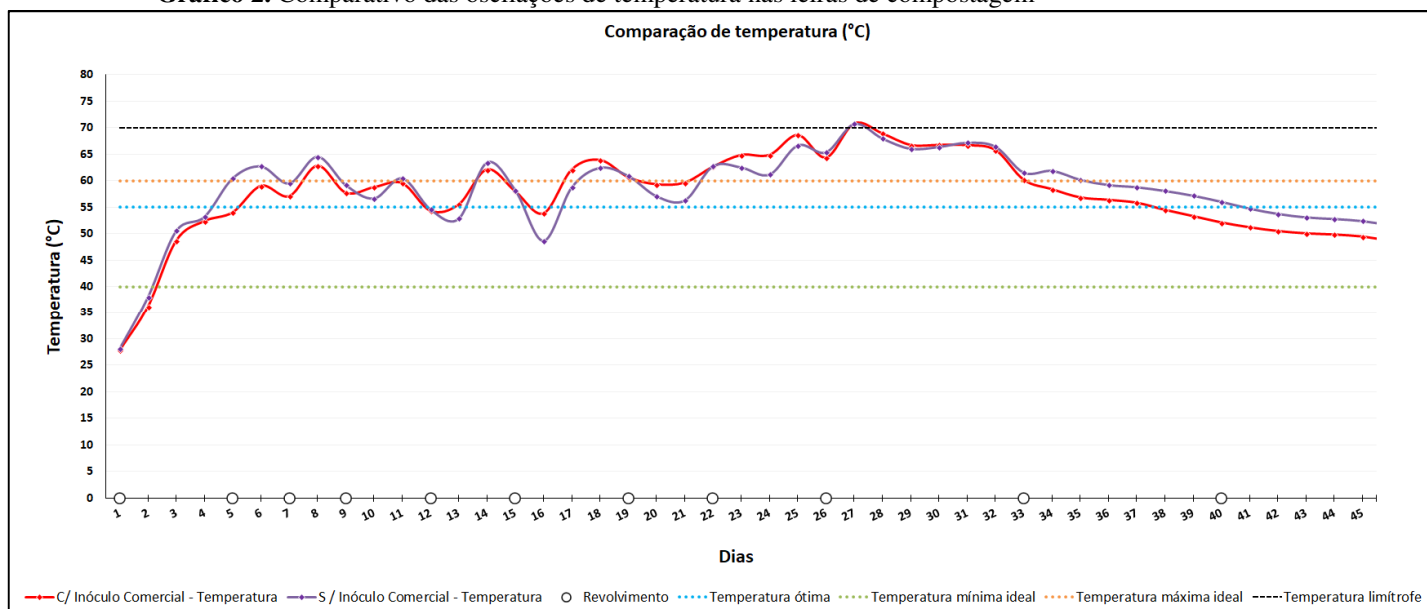
O estudo em escala real investigou o possível benefício da utilização do inóculo comercial “Acelerador de Compostagem” no processo de compostagem do lodo de esgoto gerado em reatores UASB. Os parâmetros analisados durante o processo de compostagem foram a temperatura, umidade, pH, C.E. e sólidos (totais, fixos e voláteis). Após a processo de compostagem também foi analisado o composto orgânico obtido no processo.

### 5.2.1. Temperatura

A avaliação da temperatura é uma importante ferramenta, pois permite avaliar o grau de decomposição da matéria orgânica, visto que o aumento da temperatura está diretamente relacionada com o crescimento da população de microrganismos.

O monitoramento e análise da temperatura ocorreu de forma ininterrupta durante todo o processo de compostagem, o Gráfico 2 apresenta duas curvas distintas de oscilações de temperaturas. A curva designada como (C/ Inóculo Comercial) corresponde as oscilações de temperaturas da leira que recebeu (com inóculo comercial), enquanto que a curva designada como (S/ Inóculo Comercial) corresponde a leira que não recebeu (sem inóculo comercial).

**Gráfico 2.** Comparativo das oscilações de temperatura nas leiras de compostagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

As curvas apresentaram durante todo o processo de compostagem um padrão de oscilação bem semelhante, não apresentando saltos ou declínios significativos de temperatura quando confrontadas as leituras.

Como pode ser constatado no Gráfico 2, as leiras de compostagem têm suas respectivas curvas de temperatura iniciando-se próximas a 30° C, característico da atividade de microrganismos da fase mesofílica como apontado Carvalho (2002). Notou-se que a atividade microbiológica foi bem acentuada no início do processo de compostagem, alcançando temperaturas da ordem de 45° C (fase termofílica) próximo ao início do terceiro dia de compostagem. Inácio e Miller (2009) em seus estudos explicam que este aumento de temperatura é consequência do consumo do substrato realizado pelos microrganismos termófilos.

Outro fato que ocorreu igualmente nas duas leiras de compostagem foi a oscilação de temperatura em razão dos revolvimentos realizados até o 32° dia. Esta variação ocorreu pelo fato de a temperatura não ser constante em todas as partes da leira de compostagem. Avaliações feitas por Insam e Bertoldi (2007) demonstram que o centro da leira de compostagem apresenta temperaturas mais altas em relação as partes mais externas, conseqüentemente após cada revolvimento é esperado que a temperatura diminua momentaneamente.

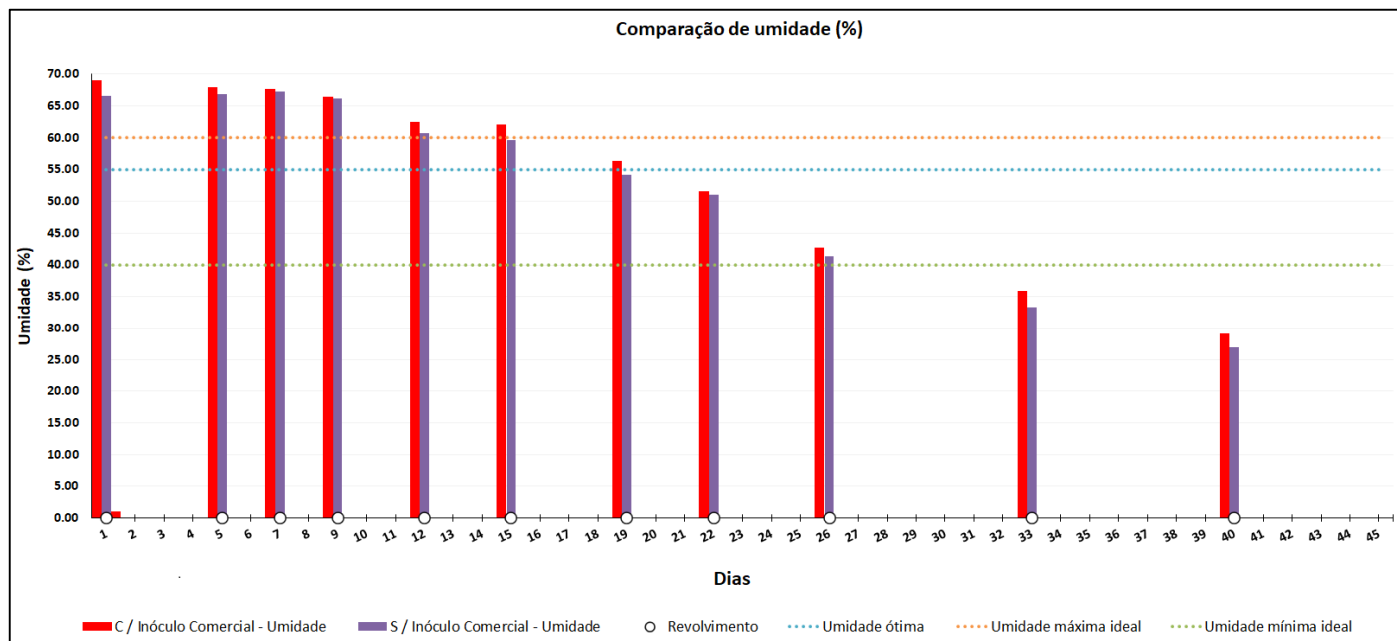
Também foi constatado que no 33° dia iniciou-se a segunda fase mesofílica, quando a atividade dos microrganismos termofílicos cessa devido ao esgotamento dos substratos, dando início ao processo de maturação do composto. Os estudos de Insam e Bertoldi (2007) demonstram que esta segunda fase se inicia a partir do momento em que as atividades dos microrganismos termofílicos cessa devido ao esgotamento dos substratos, conseqüentemente a temperatura diminui e os esporos sobreviventes oriundos de micro nichos protegidos ou por utilização do inóculo comercial, os microrganismos mesofílicos recolonizam o substrato. Por fim, a partir desta etapa do processo de compostagem, a temperatura diminuiu gradativamente sem retomadas de aumento até a finalização do estudo no 45° dia.

### **5.2.2. Umidade**

Existe uma faixa de valores de teores de umidade que propicia um melhor desenvolvimento do processo de compostagem. Esses valores encontram-se entre 40% e 60%, assim o monitoramento e análise dos teores de umidade ocorreram após cada etapa de revolvimento realizado nas leiras de compostagem. O Gráfico 3 apresenta a variação dos teores de umidades obtidas nas amostragens realizadas.



**Gráfico 3.** Variação dos teores de umidades nas leiras de compostagem do lodo de esgoto sanitário



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

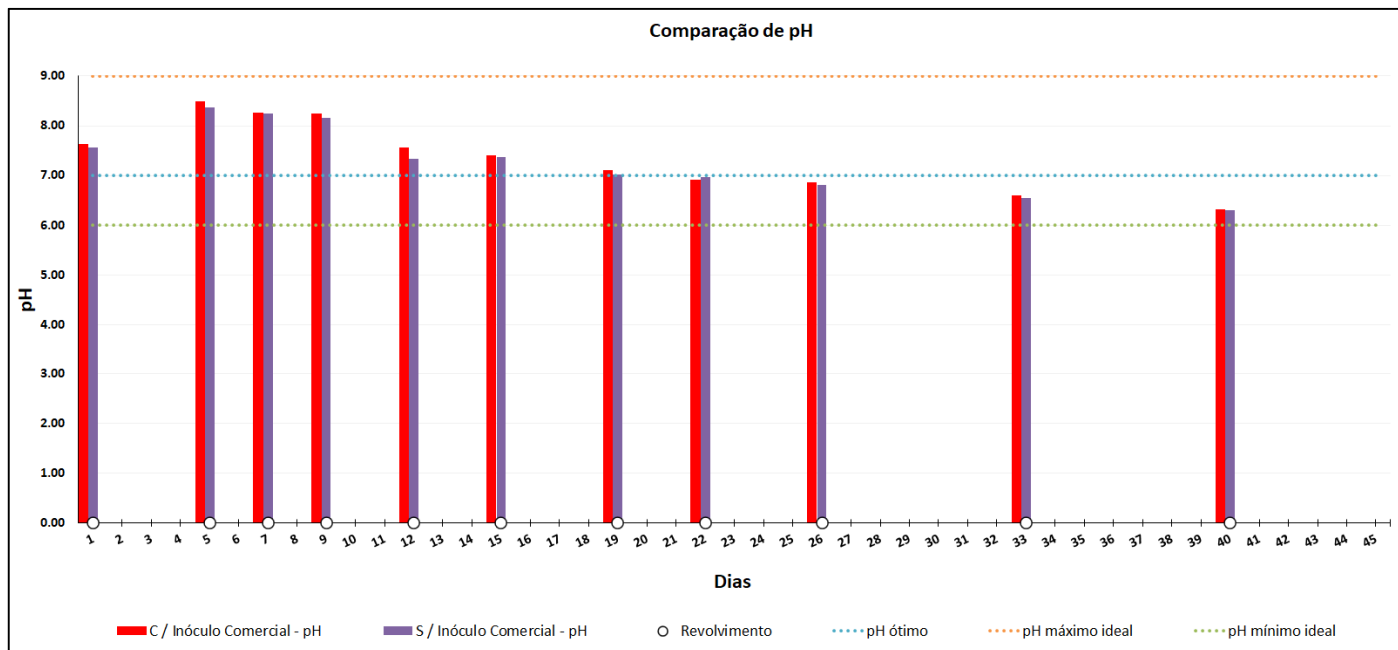
Ahn *et. al.* (2008) salientam em seus estudos que a umidade é um parâmetro crítico, pois está diretamente relacionada a atividade dos microrganismos e a estrutura física. As avaliações dos teores de umidade demonstraram que até o 33º dia de compostagem a umidade em ambas as leiras de compostagem permaneceram na ordem de 40 a 60 % indicando que o processo de degradação da matéria orgânica ocorreu de forma satisfatória. Fernandes e Silva (1999) e Kiehl (2012) apresentam em estudos realizados que esta faixa de umidade é ideal para que o processo de compostagem seja bem-sucedido. Cerri *et. al.* (2008) explica em seus estudos que no processo de decomposição da matéria orgânica, a umidade é essencial para toda atividade microbológica e deve estar presente em quantidades apropriadas durante todo ciclo de compostagem.

A partir do 33º dia, constata-se que aos teores de umidade diminuíram gradativamente até o encerramento do estudo no 45º dia. Apesar dos teores de umidade estarem abaixo dos 40%, ocorreu também uma diminuição nas temperaturas das leiras. Cabe ressaltar que os parâmetros umidade e temperatura são diretamente dependentes entre si. Deste modo podemos dizer que ocorreu um equilíbrio entre os teores de umidades e temperatura em razão atividade dos microrganismos da segunda fase mesofílica, sendo nítida a confirmação que o controle da umidade é essencial para uma boa evolução da compostagem quando comparadas as temperaturas nas leiras.

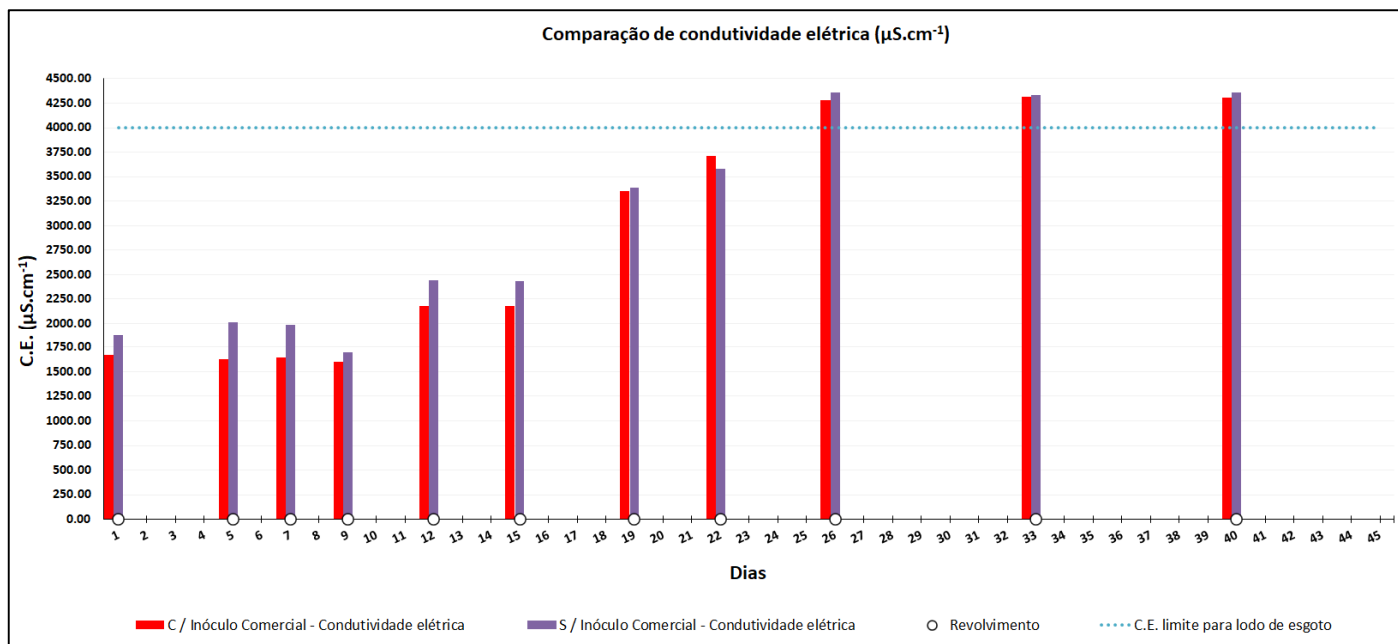
### 5.2.3. pH e Condutividade elétrica

Em relação aos monitoramentos e análises do pH e condutividade elétrica, os Gráficos 4 e 5 apresentam respectivamente as variações obtidas.

**Gráfico 4.** Variações do pH nas leiras de compostagem do lodo de esgoto sanitário



**Gráfico 5.** Variações de condutividade elétrica nas leiras de compostagem do lodo de esgoto sanitário



A avaliação do pH nas duas leiras de compostagem demonstraram que potencial hidrogeniônico apresentou valores mais elevados no início do processo de compostagem e sucessivamente diminuição no decorrer do processo de degradação da matéria orgânica. Beck-Friiset et. al. (2013) evidenciam que este fenômeno ocorre pelo fato de o processo de compostagem gerar ácidos orgânicos de cadeia curta. Komilis et. al. (2004) e Li et. al. (2013), complementam que pH em faixas ácidas diminuem significativamente a atividade dos microrganismos, no entanto como pode ser verificado no Gráfico 4, a variação do pH ocorreu na faixa situada entre 6 e 9. Mancini et. al. (2007) demonstram que esta faixa de variação é ideal para o processo de degradação da matéria orgânica e não traz prejuízos aos microrganismos. O controle deste parâmetro é a garantia de um ambiente propício para a sobrevivência e proliferação bacteriana, com valores ideais de pH encontrando-se em torno de 7,0, ou seja, pH neutro.

Em relação a variação da C.E., ambas as leiras de compostagem apresentaram situação inversa ao ocorrido com o pH, apresentando elevações gradativas da C.E. do início ao fim do processo de compostagem. Estudos desenvolvidos por Paradela (2014) demonstraram que o declínio da C.E. no início do processo de compostagem está relacionado com a fixação de amônia e outros íons durante a intensa atividade metabólica dos microrganismos, enquanto que o aumento gradual está relacionado com grau de maturação e fixação de amônia ao longo da maturação do composto produzido.

Tanto a variação de pH quanto de C.E. apresentaram indicativos que processo de degradação da matéria orgânica ocorreu de forma efetiva pelos microrganismos e que o composto orgânico obteve um grau de maturação satisfatório.

#### **5.2.4. Teores de sólidos (totais, fixos e voláteis)**

As análises dos teores de sólidos (totais, fixos e voláteis) ocorreram em 3 momentos distintos. No primeiro momento avaliou-se a estabilidade (SV/ST) do lodo de esgoto gerado em reatores UASB antes do processo de compostagem e mistura com material estruturante (casca de eucalipto). Estas análises bem como a caracterização do lodo gerado em reatores UASB foram realizadas pelo Instituto Agranômios (IAC) a pedido da SABESP. Conforme informações cedidas pela companhia, os resultados estão apresentados na Tabela 5. Num segundo momento avaliou-se a estabilidade (SV/ST) dos substratos (lodo + casca de eucalipto) durante o processo e de compostagem (Gráficos 6, 7 e 8) e no terceiro momento, avaliou-se a estabilidade (SV/ST) apresentada pelos compostos gerados após o processo de compostagem (Tabela 6).

**Tabela 5.** Teores de sólidos (totais, fixos e voláteis) no lodo de esgoto gerado em reatores UASB antes do processo de compostagem e mistura com material estruturante

Sólidos	Lodo de esgoto (%)
Totais	87,8
Fixos	***
Voláteis	48,6

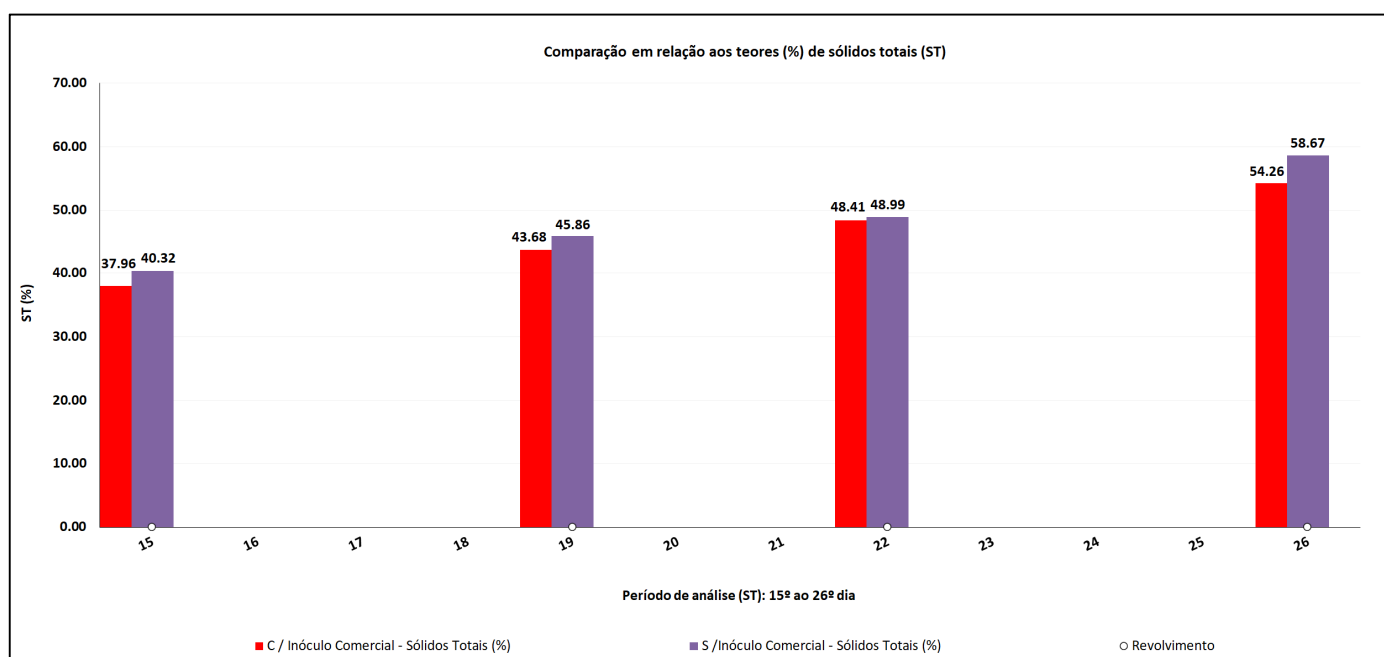
(\*\*\*) análise não realizada

Fonte: Laudos IAC (1811/15) / (MARTINS, 2016)

Considerando a Resolução N° 375/2006 do CONAMA, a avaliação da relação SV/ST (Tabela 5) no lodo de esgoto gerado em reatores UASB apresentou-se estável, tendo uma relação SV/ST igual 55%, ou seja, menor que 70% como desejável pela referida legislação.

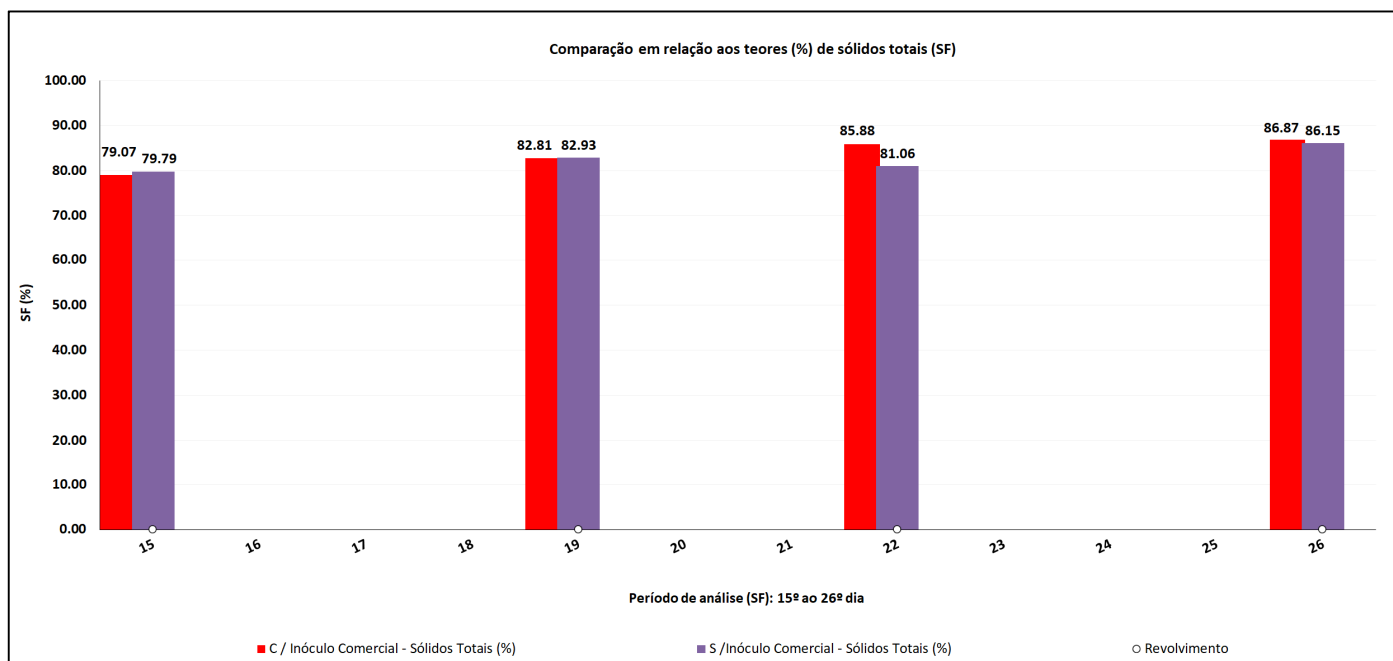
Em relação aos monitoramentos e análises do substrato durante o processo de compostagem, os Gráficos 6, 7 e 8 apresentam respectivamente os resultados obtidos.

**Gráfico 6.** Teores de sólidos totais nos substratos durante o processo de compostagem do lodo de esgoto sanitário gerado em reatores UASB



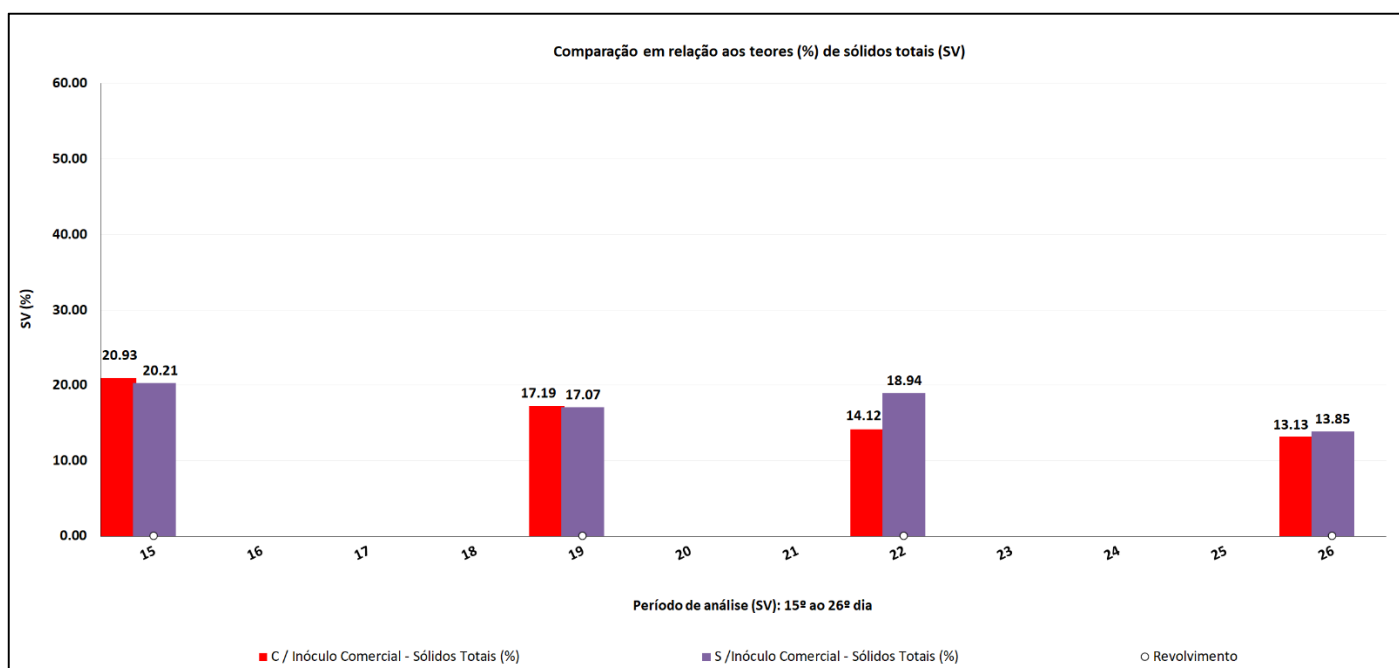
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

**Gráfico 7.** Teores de sólidos fixos nos substratos durante o processo de compostagem do lodo de esgoto sanitário gerado em reatores UASB



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

**Gráfico 8.** Teores de sólidos voláteis nos substratos durante o processo de compostagem do lodo de esgoto sanitário gerado em reatores UASB



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Como efetuado para o lodo de esgoto gerado em reatores UASB e também considerando a Resolução N° 375/2006 do CONAMA, a avaliação da relação SV/ST (Gráficos 6 e 8) média durante o período analisado tanto para o substrato que recebeu quanto para o que não recebeu o inóculo comercial foram respectivamente da ordem de 35% e 36%.

A avaliação da evolução dos teores de sólidos durante o processo de compostagem serviu para acompanhar o processo de degradação do resíduo durante o processo de compostagem. A porcentagem dos sólidos voláteis tende a diminuir à medida que a matéria orgânica é degradada, principalmente das substâncias mais facilmente biodegradáveis, e conseqüentemente ocorre um aumento no percentual de sólidos fixos. Esse processo de diminuição do ST e aumento da SF também foi constatado por Queiroz (2007) em seus estudos de compostagem de resíduos vegetais utilizando leiras revolvidas.

**Tabela 6.** Teores de sólidos (totais, fixos e voláteis) no composto orgânico gerado após processo de compostagem

<b>Sólidos</b>	<b>Composto orgânico C/ Inóculo Comercial (%)</b>	<b>Composto orgânico S/ Inóculo Comercial (%)</b>
Totais	96,34	96,79
Fixos	37,12	33,22
Voláteis	59,22	63,57

Fonte: Laudos LABORSOLOS (11056/66815) e (11056/66816) / Autor (2017)

Em relação ao grau de estabilidade SV/ST (Tabela 6) apresentado pelos compostos orgânicos gerados após o processo de compostagem, o resultado obtido para o composto que recebeu o inóculo comercial foi da ordem de 61% e para o composto orgânico que não recebeu o inóculo comercial foi da ordem de 65%. Esta relação é desejável para que o composto não apresente risco de aquecimento, processos de anaerobiose e emissão de odores conseqüente do consumo de oxigênio, bem como apresente grau de maturidade com potencial de crescimento de plantas associados ao grau de humificação da matéria orgânica.

### **5.2.5. Composto orgânico**

A avaliação do composto orgânico em relação aos teores de macronutrientes levou em consideração a caracterização inicial de macronutrientes no lodo de esgoto gerado em reatores UASB antes da mistura com casca de eucalipto e de ser submetido ao processo de compostagem, realizado pelo IAC e a caracterização final de macronutrientes no composto orgânico gerado após o processo de compostagem. A caracterização dos macronutrientes foram efetuadas de acordo com a IN/MAPA 03/2015 – Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizante e corretivos, e as respectivas avaliações das análises (laudos) foram realizadas considerando as Instruções Normativas SDA 25, 27 e 35/MAPA.

As Tabelas 7 e 8, apresentam respectivamente os resultados obtidos nas análises de macronutrientes do lodo de esgoto gerado em reatores UASB e dos compostos orgânicos gerados no processo de compostagem com e sem utilização de inóculo comercial.

**Tabela 7.** Teores de macronutrientes primários na amostra de lodo de esgoto gerado em reatores UASB

Macronutrientes	Lodo esgoto (%)
Nitrogênio total (N)	0,81
Fósforo total (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,02
Potássio solúvel (K <sub>2</sub> O)	0,18

Fonte: Laudos IAC (1810/15 e 1811/15) / (MARTINS, 2016)

**Tabela 8.** Teores de macronutrientes primários nas amostras de compostos orgânico gerados no processo de compostagem com e sem utilização de inóculo comercial

Macronutrientes	Composto orgânico C/ Inóculo Comercial (%)	Composto orgânico S/ Inóculo Comercial (%)
Nitrogênio total (N)	3,09	2,66
Fósforo total (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2,60	2,12
Potássio solúvel (K <sub>2</sub> O)	0,29	0,27

Fonte: Laudos LABORSOLOS (11056/66815) e (11056/66816) / Autor (2017)

De acordo com a IN SDA/MAPA 25/2009, a referida legislação não especifica teores mínimos e máximos para macronutrientes primários. Entretanto por meio da avaliação dos resultados, o composto orgânico que recebeu o inóculo comercial apresentou teores de macronutrientes primários maiores que o composto que não recebeu o inóculo. Em teores percentuais, houve um aumento na ordem de 16% para (N), de 23% para (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e de 8% para o (K<sub>2</sub>O)

Conforme os resultados apresentados na Tabela 8, nota-se um aumento nos teores dos três macronutrientes primários em relação aos mesmos macronutrientes obtidos na análise do lodo de esgoto. Este aumento é mais marcante e significativo em relação aos teores de Nitrogênio total (N) e Fósforo total (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Do ponto de vista agrônomo, esse aumento é significativo e desejável, uma vez que estes elementos químicos servem como fonte de nutrientes para plantas.

Em relação aos macronutrientes secundários e micronutrientes, as Tabelas 9 e 10 apresentam respectivamente os resultados das análises bem como os teores mínimos exigidos para aplicação no solo na forma sólida, conforme estabelecido na Seção III, Art. 6º na IN SDA/MAPA 25/2009.

**Tabela 9.** Teores de macronutrientes secundários e micronutrientes na amostra de lodo de esgoto gerado em reatores UASB e teores mínimos exigíveis de referência

Macronutrientes	Lodo de esgoto (%)	IN SDA 25/2009 mínimo exigível (%)
Cálcio total (Ca)	0,018	1
Magnésio total (Mg)	0,002	1
Enxofre total (S)	0,034	1
Boro total (B)	0,02	0,03
Cobre total (Cu)	0,03	0,05
Ferro total (Fe)	0,004	0,2
Manganês total (Mn)	0,002	0,05
Molibdênio total (Mo)	0,0002	0,005
Níquel total (Ni)	0,002	0,005
Zinco total (Zn)	0,056	0,1
Cobalto total (Co)	***	0,005

(\*\*\*) análise não realizada

Fonte: Laudos IAC (1810/15) / (MARTINS, 2016)

**Tabela 10.** Teores de macronutrientes secundários e micronutrientes nas amostras de compostos orgânicos gerados no processo de compostagem com e sem utilização de inóculo comercial e teores mínimos exigíveis de referência

Macronutrientes	Composto orgânico C/ Inóculo comercial (%)	Composto orgânico S/ Inóculo comercial (%)	IN SDA 25/2009 mínimo exigível (%)
Cálcio total (Ca)	1,76	1,48	1
Magnésio total (Mg)	0,20	0,22	1
Enxofre total (S)	1,34	1,31	1
Boro total (B)	N.D.	N.D.	0,03
Cobre total (Cu)	0,018	0,017	0,05
Ferro total (Fe)	2,973	2,259	0,2
Manganês total (Mn)	0,03	0,356	0,05
Molibdênio total (Mo)	0,009	0,008	0,005
Níquel total (Ni)	0,006	0,005	0,005
Zinco total (Zn)	0,04	0,04	0,1
Cobalto total (Co)	0,005	0,005	0,005

(N.D.) Não Detectável

Fonte: Laudos LABORSOLOS (11056/66815) e (11056/66816) / Autor (2017)

Considerando os teores mínimos exigíveis de macronutrientes secundários e micronutrientes pela IN SDA 25/2009, constata-se que o lodo de esgoto gerado em reatores UASB é desprovido em relação a esses elementos, e que mesmo após o processo de compostagem os resultados (Tabela 10) foram pouco satisfatórios.



Após o processo de compostagem constatou-se que apenas dois macronutrientes secundário (Ca e S) em ambas as amostras de composto orgânico, apresentaram teores acima do valor mínimo exigível pela referida legislação. Em relação aos micronutrientes, apenas o teor de (Fe) apresentou elevação em ambas as amostras, e o (Mn, Ni) apresentaram teores mais elevados apenas na amostra de composto orgânico que não recebeu o inóculo comercial. Apesar do teor de (Co) não ter sido realizado na amostra de lodo, nas amostras do composto orgânico, apresentou valores em conformidade com o mínimo estabelecido pela legislação.

De acordo com o exposto, os compostos orgânicos apresentaram um aumento percentual significativo em seus teores somente em relação macronutrientes primários, enquanto que os macronutrientes secundários e micronutrientes quase não apresentaram modificações.

Em relação aos contaminantes inorgânicos, levou-se em consideração os teores máximos admitidos em condicionadores de solo (composto orgânico), conforme consta no Anexo V da IN SDA/MAPA 27/2006. As Tabelas 11 e 12 apresentam respectivamente os resultados obtidos nas análises de contaminantes inorgânicos do lodo de esgoto gerado em reatores UASB e dos compostos orgânicos gerados no processo de compostagem com e sem utilização de inóculo comercial.

**Tabela 11.** Teores de contaminantes inorgânicos na amostra de lodo de esgoto gerado em reatores UASB e teores máximos admissíveis de referência

Contaminante inorgânico	Lodo de esgoto (mg/kg)	IN SDA 27/2006 máximo admissível (mg/kg)
Cádmio total (Cd)	4,00	3,00
Chumbo total (Pb)	20,20	150,00
Cromo total (Cr)	142,00	2,00
Níquel total (Ni)	21,60	70,00

Fonte: Laudos IAC (1810/15) / (MARTINS, 2016)

**Tabela 12.** Teores de contaminantes inorgânicos nas amostras de compostos orgânicos gerados no processo de compostagem com e sem utilização de inóculo comercial e teores máximos admissíveis de referência

Contaminante inorgânico	Composto orgânico C/ Inóculo comercial (mg/kg)	Composto orgânico S/ Inóculo comercial (mg/kg)	IN SDA 27/2006 máximo admissível (mg/kg)
Cádmio total (Cd)	36,18	36,12	3,00
Chumbo total (Pb)	53,21	50,86	150,00
Cromo total (Cr)	178,60	167,50	2,00
Níquel total (Ni)	63,43	56,47	70,00

Fonte: Laudos LABORSOLOS (11056/66815) e (11056/66816) / Autor (2017)

As análises demonstraram elevados teores de (Cr e Cd) tanto no lodo de esgoto quanto nos compostos orgânicos em relação aos teores máximos admitidos pela legislação. Cabe ressaltar que entre os contaminantes inorgânicos avaliados, o (Cd) foi o que apresentou maior variação em relação aos demais contaminantes. A presença destes contaminantes no lodo de esgoto sugeriu inicialmente o recebimento de esgoto industrial na ETE-Lageado, mas conforme informações da Companhia, a estação não recebe este tipo de esgoto afluente e o motivo da presença desta toxicidade no lodo de esgoto é sugestivo de contaminação externa, no caso, pelo material estruturante utilizado como fonte de carbono (casca de eucalipto).

A contaminação do lodo de esgoto pode ser justificada pelo fato de a companhia ter registrado posteriormente junto ao MAPA o lodo de esgoto apenas desaguado como condicionador de solos sem passar pelo processo de compostagem. Assim, deve-se levar em consideração que para o registro é necessário no mesmo, a ausência de microrganismos patogênicos e a ausência ou quando presente, teores de contaminantes inorgânicos abaixo do valor máximo permitido pela legislação.

## **6. CONCLUSÕES**

### **6.1. PROJETO PRELIMINAR**

Conclui-se nesta primeira etapa do estudo que o processo de compostagem quando realizado em escala reduzida não alcança a desejada fase termofílica, necessária para higienização e bioestabilização do composto final. Isto decorre em razão do sistema em escala reduzida perder facilmente calor e umidade para o meio externo. Se por um lado o sistema não consegue reter calor para que os microrganismos da fase termofílica se desenvolvam, por outro lado, a perda de umidade prejudica a atividade dos microrganismos mesofílicos, comprometendo de forma generalizada todo o processo de compostagem.

Apesar do exposto, devido a agregação de serragem de madeira ao lodo de esgoto, propiciou a redução de volume devido ao favorecimento do processo de desaguamento do resíduo pela perda de umidade.

### **6.2. PROJETO EM ESCALA REAL**

Conclui-se nesta segunda etapa do estudo que a utilização de inóculo comercial no processo de compostagem de lodo de esgoto é desnecessária, uma vez que não foi

constatado durante o estudo, mudanças potencialmente significativas em relação aos parâmetros físico-químicos avaliados.

Apesar do inóculo comercial utilizado ser constituído por microrganismos efetivos (EM), o mesmo não viabilizou ganhos no processo de compostagem, como diminuição do tempo de compostagem (compostagem acelerada) e obtenção de composto orgânico de melhor qualidade.

## **7. RECOMENDAÇÕES**

Apesar do inóculo comercial não ter apresentado desempenho satisfatório no processo de compostagem de lodo de esgoto gerado em sistema de tratamento anaeróbio (reatores UASB) que justifique sua utilização, recomenda-se reproduzir o estudo utilizando lodo de esgoto lodo de esgoto sanitário gerado em sistemas aeróbios.

Neste sentido, sugere-se o desenvolvimento de estudos que tenham por finalidade analisar a relação entre o habitat oferecido pelo lodo de esgoto sanitário gerado em diferentes plantas de tratamento e o habitat necessário para o desenvolvimento dos microrganismos efetivos (EM) presente no inóculo comercial.

Em relação ao teste de bancada (projeto preliminar), sugere-se que o mesmo seja desenvolvido em área apropriada, tipo galpão e estufa, condizentes ao processo de compostagem, fora do laboratório, em escala que apresente no mínimo 1,5 m<sup>3</sup> de resíduos e material estruturante usado como fonte de carbono com objetivo de manter temperatura e umidade para o processo de compostagem.

## 8. REFERÊNCIAS

- ADDISON, K. Albert Howard. In. Sir Albert Howard Memorial Issue. Organic Gardening Magazine, v. 13, n. 8, 1948, **Journey to Forever**, 2000.
- ALEM SOBRINHO, P. Tratamento de esgoto e produção de lodo. In: **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001. p. 7 – 40
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSN; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. **Standard Methods for Examination of Water & Wastewater**. 21ST ed., p. 1274, Washington, APHA/AWWA/WPCF, 2005.
- ANDRADE, C. A.; CARVALHO, C. S.; RIBEIRINHO, V. S.; PIRES, A. M. M. **Degradação do carbono orgânico do lodo de esgoto no solo e relação com a disponibilidade de nitrogênio**. II CBRO - Congresso Brasileiro de Resíduos Orgânicos: Biossólido na Agricultura. Vitória-ES, 2009.
- ANDRADE, J. A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S. F. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química**, v. 35, n. 3, 2010.
- ANDREOLI, C. V. **A gestão de bissólidos no Paraná**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPECIALIDADES EM MEDICINA VETERINÁRIA. AMEVE, 2002, Curitiba. **Anais...** Curitiba: 2002. p. 43 – 46.
- ARAÚJO, J. M. **Estratégias para o isolamento de actinomicetos**. In. Melo, I. S; AZEVEDO, J. L. **Ecologia microbiana**. Jaguariúna: Embrapa/CNPMA, 1998. p. 351-367.
- AHN, H. K.; RICHARD, T. L.; GLANVILLE, T. D. Optimum moisture levels for biodegradation of mortality composting envelope material. **Waste Management**, v. 28, p. 1411-1416, 2008.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH AMERICAN; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 22ed Washington, APHA/AWWA/WEF, 2012. 1360 p.
- ANAND, C. K.; APUL, D. S. Composting toilets as a sustainable alternative to urban sanitation – A review. **Waste Management**, v. 34, p. 329-343, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10664:1989 – Águas – Determinação de resíduos (sólidos) – Método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 1989. 7p.
- \_\_\_\_\_. ABNT. NBR 14340:1999 – Água – Determinação da condutividade e da resistividade elétrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1999. 3p
- \_\_\_\_\_. ABNT. NBR 10004:2004 – Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 71p.

- \_\_\_\_\_. ABNT. NBR 10005:2004 – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 16p.
- \_\_\_\_\_. ABNT. NBR 10006:2004 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 3p.
- \_\_\_\_\_. ABNT. NBR 10007:2004 – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 21p.
- \_\_\_\_\_. ABNT. NBR 7353:2014 – Soluções aquosas – Determinação do pH com eletrodos de vidro. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 8p.
- BARKA, E. A.; VATSA, P.; SANCHEZ, L.; GAVEAU-VALLANT, N.; JACQUARD, C.; KLENK, H-P.; CLÉMENT, C.; OUHDOUCH, Y.; van WEZEL, G. P. Taxonomy, physiology, and natural products of actinobacteria. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 80, n. 1, p. 1-43, 2016.
- BERNAL, M. P.; ALBURQUERQUE, J. A.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 5444-5453, 2009.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, 1988.
- \_\_\_\_\_. **Decreto Nº. 99.274, de 06 de junho de 1990**. Regulamenta a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, e a Lei Nº. 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõem, respectivamente sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental e sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, e dá outras providências. Brasília, 1990.
- \_\_\_\_\_. **Decreto Nº. 3.179, de 21 de setembro de 1999**. Dispõe sobre a especificação das sanções aplicáveis às condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, 1999.
- \_\_\_\_\_. **Decreto Nº. 6.514, de 22 de julho de 2008**. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências. Brasília, 2008.
- \_\_\_\_\_. **Decreto Nº. 54.645, de 05 de agosto de 2009**. Regulamenta dispositivos da Lei Nº. 12.300 de 16 de março de 2006, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e altera o inciso I do artigo 74 do Regulamento da Lei Nº. 997, de 31 de maio de 1976, aprovado pelo Decreto Nº. 8.468, de 8 de setembro de 1976. São Paulo, 2009.
- \_\_\_\_\_. **Decreto Nº. 7.217, de 21 de junho de 2010**. Regulamenta a Lei Nº. 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. Brasília, 2010.
- \_\_\_\_\_. **Decreto Nº. 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Regulamenta a Lei Nº. 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília, 2010.

---

\_\_\_\_\_**Decreto Nº. 8.059, de 26 de julho de 2013.** Altera o Anexo ao Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que aprova o Regulamento da Lei Nº. 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília, 2013.

\_\_\_\_\_**Decreto Nº. 8.384, de 29 de dezembro de 2014.** Altera o Anexo ao Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que aprova o Regulamento da Lei Nº. 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura. Brasília, 2014.

\_\_\_\_\_**Lei Nº. 6.894, de 16 de dezembro de 1980.** Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências. Brasília, 1980.

\_\_\_\_\_**Lei Nº. 6.934, de 13 de julho de 1981.** Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes, ou biofertilizantes, destinados à agricultura, e dá outras providências. Brasília, 1981.

\_\_\_\_\_**Lei Nº. 6.938, de 31 de agosto de 1981.** Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, 1981.

\_\_\_\_\_**Lei Nº. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, 1998.

\_\_\_\_\_**Lei Nº. 12.300, de 16 de março de 2006.** Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes. São Paulo, 2006.

\_\_\_\_\_**Lei Nº. 11.445, de 05 de janeiro de 2007.** Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis Nºs. 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Brasília, 2007.

\_\_\_\_\_**Lei Nº. 12.305, de 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Nº. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.

\_\_\_\_\_**Lei Nº. 12.890, de 10 de dezembro de 2013.** Altera a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. Brasília, 2013.

- 
- \_\_\_\_ Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa SDA Nº. 10 de 06 de maio de 2004.** Aprova as disposições sobre a classificação e os registros de estabelecimentos e produtos, as exigências e critérios para embalagem, rotulagem, propaganda e para prestação de serviço, bem como os procedimentos a serem adotados na inspeção e fiscalização da produção, importação, exportação e comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes, destinados à agricultura. Diário da União, Brasília, 12 mai. 2004.
- \_\_\_\_ Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa SDA Nº. 35 de 04 de julho de 2006.** Fica aprovada as normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura, na forma do Anexo a esta Instrução Normativa. Diário da União, Brasília, 12 jul. 2006.
- \_\_\_\_ Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa SDA Nº. 27 de 05 de junho de 2006.** Fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes, para serem produzidos, importados ou comercializados, deverão atender aos limites estabelecidos nos Anexos I, II, III, IV e V desta Instrução Normativa no que se refere às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas. Diário da União, Brasília, 02 mai. 2016.
- \_\_\_\_ Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa SDA Nº. 25 de 28 de julho de 2009.** Aprova as 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, na forma dos Anexos à presente Instrução Normativa. Diário da União, Brasília, 28 jul. 2009.
- \_\_\_\_ Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos.** Coordenação-Geral de Apoio Laboratorial; Murilo Carlos Muniz Veras (Org.) - Brasília: MAPA/SDA/CGAL, 220p, 2014.
- \_\_\_\_ Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução Nº. 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, 2005.
- \_\_\_\_ Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução Nº. 375, de 29 de agosto de 2006.** Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Brasília, 2006.
- \_\_\_\_ Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução Nº. 380, de 31 de outubro de 2006.** Retifica a Resolução CONAMA Nº. 375/06 – Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências Brasília, 2006.

- \_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução Nº. 481, de 03 de outubro de 2017**. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Brasília, 2017.
- BUDZIALK, C. R.; MAIA, C. M. B. F.; MANGRICH, A. S. Transformações químicas da matéria orgânica durante a compostagem de resíduos da indústria curtumeira. **Química Nova**, v.27, n.3, p. 399-403, 2004.
- CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgoto no Brasil: cenários e inovações**. In: BAGNATO, V. S.; BARRIONUEVO, W. (Coord). Intercâmbio de inovações tecnológicas entre Brasil e Itália. São Carlos: Instituto de Física de São Carlos, USP, 2013.
- CARVALHO, P. C. T. **Compostagem**. In: Tsutiya et. al. Biossólidos na agricultura. São Paulo-SP: ABES-SP, 2002. x - 468p. 181-208.
- CERRI, C. E. P.; OLIVEIRA, E. C. A.; SARTORI, R. H.; GARCEZ, T. B. **Compostagem**. 2008. 19f. ESALQ - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **P 4.230: Aplicação de lodos de sistema de tratamento biológico em áreas agrícolas: Critérios para projetos e operação**, agosto (1999). 32p. (Manual Técnico).
- CORREIA, J. E. **Caracterização físico-química e microbiológica do lodo gerado na Estação de Tratamento de Esgoto Contorno. Feira de Santana, BA**. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, 2009. Disponível em: <<https://portalseer.ufba.br/index.php/gesta/article/view/12789>> Acesso em: 11 de fev. 2018.
- CHANG, J.; HSU, T. Effects of compositions on food waste composting. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 8068-8074, 2008.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/default.aspx>>. Acesso em: 19 jan. 2017.
- COOPERBAND, L. R. Composting: The art and science of converting Organic Waste to a valuable soil resource. **Laboratory Medicine**. v. 31, p. 238-290, 2004.
- DEPLEDGE, D. **Design examples of waterless composting toilets**. SOPAC – South Pacific Applied Geoscience Commission, 2013.
- DIAZ, L. F.; BERTOLDI, M. History of composting. **Waste Management Series: Compost Science and Technology**, v. 8, p. 7-24, 2007.
- DIAZ, L. F.; SAVAGE, G. M. Factors that affect the process. **Waste Management Series: Compost Science and Technology**, v.8, p. 49-65, 2007.



- EIRA, A. F. **Uso de inoculantes na compostagem**. I SICOM - Simpósio sobre compostagem - "Ciência e Tecnologia". GEMFER - Grupo de Estudos e Pesquisa em Manejo de Fertilizantes e Resíduos. UNESP - Faculdade de Ciências de Agrônômicas. Botucatu, SP, 2004.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo** / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212p.: il. (EMBRAPA-CNPS. Documentos; 1).
- ESPOSITO, E.; AZEVEDO, J. L. **Fungos: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia**. Caxias do Sul: Educs, 2004.
- \_\_\_\_\_. Fungos: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia. In. DURÁN, N. **Enzimas lignolíticas**. p. 245-260, Caxias do Sul: Educs, 2004.
- \_\_\_\_\_. Fungos: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia. In. SILVA, M.; ESPOSITO, E. **O papel dos fungos na recuperação ambiental**. p. 337-375, Caxias do Sul: Educs, 2004.
- FAJARDO, P. A. **Proposta de instrumentos para a realização de análise ambiental inicial em ETEs à luz da NBR ISSO 1400:2004: O caso da ETE-Monjolinho, São Carlos-SP**. 2014. 229f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/4379/6028.pdf?sequence=1>> Acesso em: 14 de abr. 2018.
- FELS L. E.; ZAMAMA, M.; ASLI, A. E.; HAFIDI, M. Assessment of biotransformation of organic matter during co-composting of sewage sludge-lignocelulosic waste by chemical, FTIR analyses, and phytotoxicity tests. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 87, p. 128-137, 2014.
- FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para compostagem de biossólidos**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 84p.
- FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para compostagem de biossólidos**. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico PROSAB. Londrina: Universidade Estadual de Londrina – UEL, 2008. 91p.
- FRIIS-BECK, B.; SMARS, S.; JÖNSSON, H.; KIRCHMANN, S.E. Structures and Environmental: Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 78, n. 4, p. 423-430, 2001.
- INÁCIO, C. T.; MILLER, P. R. M. **Compostagem: Ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos**. Rio de Janeiro-RJ: Editora: Embrapa Solos, 2009. 156p
- HAN, W.; CLARKE, W.; PRATT, S. Composting of waste algae: A review. **Waste Management**, v. xxx, p. xxx-xxx, 2014.
- HAUG, R. T. **The practical handbook of compost engineering**. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 2000, 719p.

- HUI, Y., LI'AO, W.; FENWEI, S., GANG, H. Urban solid waste management in chongqing: challenges and opportunities. **Waste Management**, v. 26, p. 1052-1062, 2006.
- INSAM, H.; BERTOLDI, M. Microbiology of the composting process. **Waste Management Series: Compost Science and Technology**, v. 8, p. 25-48, 2007.
- JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.
- JUSOH, M. L. C.; MANAF, L. A.; LATIFF, P. A. Composting of rice straw with effective microorganisms (EM) and its influence on compost quality. **Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering**, 10:17, 2013.
- KIEHL, Edmar. Manual de Compostagem Maturação e Qualidade do Composto. Ed. Ceres. Piracicaba, 1998.
- KIEHL, E. J. **Manual de Compostagem: Maturação e Qualidade do Composto**. Piracicaba-SP: Gráfica e Editora Degaspari, 2012. 171p.
- KOMILIS, D. P.; HAM, R. K.; PARK, J. K. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solidwastes. **Water Research**, v. 38, p. 1707-1714.
- KMA, Korin Meio Ambiente (2016). São Paulo, SP.
- LEITE, T. A. **Compostagem termofílica de lodo de esgoto: Higienização e produção de biossólido para uso agrícola**. 2015. 167f. Dissertação (Mestrado em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade) – Programa de Pós-Graduação em Ambiente, Saúde e Sustentabilidade – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6139/tde-02122015-142451/pt-br.php>> Acesso em: 10 de fev. 2018.
- LI, Z.; LU, H.; REN, L.; HE, L. Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. **Chemosphere**, v. 93, p. 1247-1257, 2013.
- LOPES, A. O.; PORTUGAL, N. S.; PORTUGAL JUNIOR, P. S.; GUEDES, L. C. V. **Produção de metano em estações de tratamento de esgotos e co-geração de energia elétrica: Um estudo de caso na ETE em Passos-MG**. In: XXXI ENCONTRO Nacional de Engenharia de Produção. ENEGEP, 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: 2011. p. 1 – 15.
- MANCINI, S. D.; NOGUEIRA, A. R.; KAGOHARA, D. A.; SCHWARTZMAN, J. A. S.; MATTOS, T. Análises termogravimétricas de composto orgânico produzido com restos de comida e lixo de jardim. In 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2007, Belo Horizonte. **Anais**. Minas Gerais: ABES, 2007.
- MARTINS, S. F. **Análise da produção de lodo de esgoto compostado para uso na agricultura**. 2016. 60f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/144598>> Acesso em: 08 de jun. 2018.

- METCALF, EDDY. **Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse**. New York: Ed. McGraw-Hill, 1334p.,2002.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). In Situ Bioremediation: When does it work? Washington, DC, National Academy Press, 1993.
- NORD, E. Qualidade química na compostagem de resíduos sólidos com inoculação biológica. **Revista de Estudos Sociais**, n. 30, v. 15, p. 149, 2013.
- OLIVEIRA, F. C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num latossolo vermelho- amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. 2000. 247. Tese (Doutorado)-Universidade de São Paulo, 2000.
- OLIVEIRA, F. N. S.; LIMA, H. J. M.; CAJAZEIRA, J. P. **Uso da compostagem em sistemas agrícolas orgânicos**. Embrapa Agroindustrial Tropical. Documentos 89, Fortaleza, CE, 2004. 17p.
- OUHDOUCH, Y.; BARAKATE, M.; FINANCE, C. Actinomycetes of moroccan habitats: isolation and screening for antifungalactivities. **European Journal Soil Biology**. Montaigne, v. 37, n. 2, p. 69-74, 2001.
- PAN, I.; DAM, B.; SEN, S. K. Composting of common organic wastes using microbial inoculants. **Biotech**, v. 2, p. 127-134, 2012.
- PARADELA, C. S. **Projeto piloto de compostagem acelerada**. 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Ambiente, Universidade do Porto, Porto, Portugal. Disponível em: <[https://sigarra.up.pt/reitoria/pt/pub\\_geral.show\\_file?pi\\_gdoc\\_id=384646](https://sigarra.up.pt/reitoria/pt/pub_geral.show_file?pi_gdoc_id=384646) > Acesso em: 15 de fev. 2018.
- PATLE, A. V.; WILLIAMS, S. P. M. P, GABHANE, J.; DHAR, H.; NAGARNAIK, P. B. Microbial assisted rapid composting of agriculture residues. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, n. 5, v. 5, p. 1097-1099, 2014.
- PAZ, V.; UMBIDES, R.; MISHIMA, H.; SÁNCHEZ, A. P.; PINTO. M. I. S. Tratamiento de los residuos urbanos en Santiago del Estero (Argentina): Una experiencia piloto. **Revista Técnica**, n. 71, p. 40-47, 2003.
- PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; DE SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – Uma Revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, n. 16, p. 89-XX. 2010.
- PEREIRA NETO, J. T. **Manual de compostagem: processo de baixo custo**. Viçosa, MG: UFV, 2007.
- PIRES, A.; MARTINHO, G.; CHANG, N. Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques. **Journal of Environmental Management**, v. 92, p. 1033-1050, 2011.
- PRIMO, D. C.; FADIGAS, F. S.; CARVALHO, J. C. R.; SCHMIDT, C. S.; BORGES FILHO, A. C. S. Avaliação da qualidade nutricional de composto orgânico produzido com resíduos de fumo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V. 14, n. 7, p. 742-476, 2010.

- QUEIROZ, F. F. **Avaliação do aproveitamento de resíduos vegetais por meio da compostagem em leiras revolvidas. Estudo de caso de Londrina.** 2007. 66f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Programa de Pós-Graduação Engenharia de Edificações e Saneamento – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, SP. Disponível em: <<http://www.uel.br/pos/enges/portal/pages/arquivos/dissertacao/38.pdf>> Acesso em: 15 de set. 2018.
- QIAN, X.; SHEN, G.; WANG, Z.; GUO, C.; LIU, Y.; LEI, Z.; ZHANG, Z. Co-composting of livestock manure with rice straw: Characterization and establishment of maturity evaluation system. **Waste Management**, v. 34, p. 530-535, 2014.
- REBOLLIO, R.; MARTÍNEZ, J.; AGUILERA, Y.; MELCHOR, K.; KOERNER, I.; STEGMANN, R. Microbial populations during composting process of organic fraction of municipal solid waste. **Applied Ecology and Environmental Research**, v.6, p.61-67, 2008.
- RICHARD, T. L.; HAMELERS, H.; VEEKEN, A.; SILVA, T. Moisture relationships in composting processes. *Compost Science & Utilization*, **Taylor Francis Online**, v. 10, n. 4, p. 286-302, 2002.
- ROSSA, Ü. B. **Estimativa de calagem pelo método SMP para alguns solos do Paraná.** 2006. 137f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. Disponível em: <[http://www.pgcisolo.agrarias.ufpr.br/dissertacao/2005\\_09\\_19\\_rossa.pdf](http://www.pgcisolo.agrarias.ufpr.br/dissertacao/2005_09_19_rossa.pdf)> Acesso em: 10 de fev. 2018.
- SALETTI FIBRAS – Produtos em fibra de vidro. Disponível em: <<http://salettifibras.com.br/site/biodigestor/>>. Acesso em 09 mai. 2018.
- SANEAMENTO DE GOIÁS-SANEAGO. Informe Saneago. Goiânia, 29 junho de 2002a. p.3-7.
- SHAMMAS, N. K; WANG, L. L. Biosolids composting. In: WANG, K. L.; SHAMMAS, N. K.; HUNG, Y. (eds) **Biossolids treatment process**. Totowa, NJ: Humana Press, 2007. (Handbook of environmental engineering, v.6).
- SHAUB, S. M.; LEONARD, J. J. Composting: An alternative waste management option for food processing industries. **Trends in Food Science & Technology**, v. 7, p. 263-267, 1996.
- SOARES, M. R. (2004). **Coefficiente de distribuição (kd) de metais pesados em solos do estado de São Paulo.** 2004. 202p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Paulo: 2004.
- SOUZA, P. O. **Avaliação de diferentes inoculantes na compostagem em biorreatores de bancada.** 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com\\_docman&view=download&alias=2745-paulo-oliveira-de-souza&category\\_slug=2016&Itemid=428&lang=pt-br](http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=2745-paulo-oliveira-de-souza&category_slug=2016&Itemid=428&lang=pt-br)> Acesso em: 12 de fev. 2018.

- TÖRNROTH-HORSEFIELD, S.; NEUTZE, R. Opening and closing the metabolite gate. **PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 105, n. 50, 2008.
- TORRES DE CARVALHO, P. C. **Compostagem**. In. TSUTIYA, M. T. *et. al.* (Eds). **Biossólidos na agricultura**. 2º ed. São Paulo: ABES, SP, 2002.
- TREVIZAM, A. R.; ABREU JUNIOR, C. H.; ARMELIN, M. J. A.; MURAOKA, T.; VILLANUEVA, F. C. A. **Contaminantes inorgânicos em resíduos orgânicos**. International Nuclear Atlantic Conference - INAC, Santos, SP, 2005.
- TSUTIYA, M. T.. Alternativas de disposição final de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: **Impacto Ambiental do Uso Agrícola de Lodo de Esgoto**. Jaguariúna: Ed. Bettiol e Camargo, 2000. 312p.
- TWARDOWSKA, I.; SCHRAMM, K.; BERG, K. Sewage sludge. **Waste Management Series: Assessment, Monitoring and Remediation**, v. 4, p. 239-295, 2004.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. **The standards for the use or disposal of sewage sludge**. Whashington, DC: Federal Register, Code of Federal Regulations CFR, Title 40, Protection of Environmental – Part 260-265 – Hazardous waste management, 1993.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Test methods for evaluating solid waste: physical / chemical methods**. 3º ed. Whashington, DC: EPA, 2004.
- VALIM, M. C. A. **Compostagem de lodo de esgotos com resíduos agrícolas através da aeração forçada positiva**. Rio de Janeiro: ABES, 1997. p.10
- von SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**, 2. ed., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1).
- \_\_\_\_\_. **Lagoas de Estabilização**, 2. ed. ampl., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013. 196 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 3).
- \_\_\_\_\_. **Lodos Ativados**, 3. ed., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 428 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 4).
- VAN HAANDEL, A. C.; MARAIS, G. V. R. **O comportamento do sistema de lodo ativado**. Campina Grande: Epgraf, 1999.
- von SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. **Biological wastewater treatment in warm climate regions**. Vols. 1-2. London: IWA Publishing, 2005. 1496 p.
- WEI, Z.; XI, B.; ZHAO, Y.; WANG, S.; LIU, H.; JIANG, Y. Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid. **Chemosphere**, v. 68, p. 368-374.

YAMADA, Y.; KAWASE, Y. Aerobic composting of waste activated sludge: Kinetic analysis for microbiological reaction and oxygen consumption. **Waste Management**, v. 26, p. 49-61, 2006.


ZHOU, C.; LIU, Z.; HUANG, Z.; DONG, M.; YU, X.; NING, P. A new strategy for co-composting dairy manure with rice straw: Addition of different inocula at three stages of composting. **Waste Management**, v. 40, p. 38-43, 2015.

## 9. ANEXOS

## ANEXO I

Análises do consposto orgânico que não recebeu o inóculo comercial durante o processo de compostagem

Amostra (S/ Inóculo Comercial)



SOLICITANTE	WELLITON LEANDRO DE OLIVEIRA BOINA	DATA ENTRADA	25/10/2017
PROPRIETÁRIO	WELLITON LEANDRO DE OLIVEIRA BOINA	DATA SAÍDA	01/11/2017
PROPRIEDADE	NAO INFORMADO	CÓD. LAB.	11056/66815
MUNICÍPIO	PRESIDENTE PRUDENTE-SP	CÓD. INTERES.	AMOSTRA (S/ INÓCULO COMERCIAL)

### RELATÓRIO DE ENSAIO: FERTILIZANTE ORGÂNICO

#### CARACTERIZAÇÃO AGRONÔMICA

DETERMINAÇÃO		%
N	Nitrogênio Total	2,66
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fósforo Total	2,12
K <sub>2</sub> O	Potássio Solúvel	0,27
Ca	Cálcio Total	1,48
Mg	Magnésio Total	0,22
S	Enxofre Total	1,31
		mg/kg
B	Boro Total	N.D.
Cl	Cloro Solúvel	***
Cu	Cobre Total	176,30
Fe	Ferro Total	22.590,00
Mn	Manganês Total	3.561,00
Mo	Molibdênio Total	89,37
Na	Sódio Total	526,00
Ni	Níquel Total	56,47
Zn	Zinco Total	412,00

#### CARACTERIZAÇÃO COMPLEMENTAR

DETERMINAÇÃO	%
Carbono Orgânico	19,43
Carbono Total	28,64
Umidade perdida a 65°C	18,92
Umidade perdida a 110°C	3,21
Sólidos Totais Fixos a 110°C	96,79
Sólidos Totais Fixos a 550°C	33,22
Sólidos Voláteis Totais	63,57

#### RELAÇÕES AGRONÔMICAS

	Referência	
	mmolc/kg	mmolc/kg
CTC (Cap. Troca de Cátions)	332,00	≥ 200
%		
CRA (Cap. Retenção de Água)	76,96	≥ 60
Relação C.O./N	7,30	≤ 18
Relação CTC/C	11,59	≥ 20

#### CONTAMINANTES INORGÂNICOS

DETERMINAÇÃO		mg/kg
Cd	Cádmio Total	36,12
Pb	Chumbo Total	50,86
Cr	Cromo Total	167,50
Co	Cobalto Total	52,67

#### FÍSICO-QUÍMICA


pH em CaCl <sub>2</sub>	6,30
µS/cm	
Condutividade Elétrica	4.360,00
Índice Salino	0,46
g/cm <sup>3</sup>	
Densidade	0,25

OBS. A ANÁLISE É REALIZADA NA AMOSTRA SECA A 65°C  
ESTE RELATÓRIO REPRESENTA A AMOSTRA ENTREGUE AO LABORATÓRIO E IDENTIFICADA PELO INTERESSADO.  
N.D. NÃO DETECTADO. \*\*\* ENSAIO NÃO SOLICITADO.  
Help Us Preserve The Soil  
Laboratório do Brasil S/S Ltda. : Av. Tiradentes, 3.173 - CEP 86.072-000 - Londrina - PR - Brasil - Telefone: (43) 3338-5738 | www.laborsolo.com.br | laborsolo@laborsolo.com.br

## ANEXO II

Análises do consposto orgânico que recebeu o inóculo comercial durante o processo de compostagem

Amostra (C/ Inóculo Comercial)



SOLICITANTE	WELLITON LEANDRO DE OLIVEIRA BOINA	DATA ENTRADA	25/10/2017
PROPRIETÁRIO	WELLITON LEANDRO DE OLIVEIRA BOINA	DATA SAÍDA	01/11/2017
PROPRIEDADE	NAO INFORMADO	CÓD. LAB.	11056/66816
MUNICÍPIO	PRESIDENTE PRUDENTE-SP	CÓD. INTERES.	AMOSTRA (C/ INÓCULO COMERCIAL)

### RELATÓRIO DE ENSAIO: FERTILIZANTE ORGÂNICO

#### CARACTERIZAÇÃO AGRONÔMICA

DETERMINAÇÃO		%
N	Nitrogênio Total	3,09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fósforo Total	2,60
K <sub>2</sub> O	Potássio Solúvel	0,29
Ca	Cálcio Total	1,76
Mg	Magnésio Total	0,20
S	Enxofre Total	1,34
<b>mg/kg</b>		
B	Boro Total	N.D.
Cl	Cloro Solúvel	***
Cu	Cobre Total	188,10
Fe	Ferro Total	29.730,00
Mn	Manganês Total	378,00
Mo	Molibdênio Total	93,43
Na	Sódio Total	565,90
Ni	Níquel Total	63,43
Zn	Zinco Total	489,10

#### CARACTERIZAÇÃO COMPLEMENTAR

DETERMINAÇÃO	%
Carbono Orgânico	17,00
Carbono Total	25,41
Umidade perdida a 65°C	22,75
Umidade perdida a 110°C	3,66
Sólidos Totais Fixos a 110°C	96,34
Sólidos Totais Fixos a 550°C	37,12
Sólidos Voláteis Totais	59,22

#### RELAÇÕES AGRONÔMICAS

	Referência	
	mmolc/kg	mmolc/kg
CTC (Cap. Troca de Cátions)	372,00	≥ 200
CRA (Cap. Retenção de Água)	%	%
	73,66	≥ 60
Relação C.O./N	5,50	≤ 18
Relação CTC/C	14,64	≥ 20

#### CONTAMINANTES INORGÂNICOS

DETERMINAÇÃO		mg/kg
Cd	Cádmio Total	36,18
Pb	Chumbo Total	53,21
Cr	Cromo Total	178,60
Co	Cobalto Total	53,88

#### FÍSICO-QUÍMICA

pH em CaCl <sub>2</sub>	6,32
Condutividade Elétrica	µS/cm
	4.310,00
Índice Salino	0,45
Densidade	g/cm <sup>3</sup>
	0,29

OBS. A ANÁLISE É REALIZADA NA AMOSTRA SECA A 65°C  
ESTE RELATÓRIO REPRESENTA A AMOSTRA ENTREGUE AO LABORATÓRIO E IDENTIFICADA PELO INTERESSADO.  
N.D. NÃO DETECTADO \*\*\* ENSAIO NÃO SOLICITADO.  
Help Us Preserve The Soil  
Laborsolo do Brasil S/S Ltda. - Av. Tiradentes, 3.173 - CEP 86.072-000 - Londrina - PR - Brasil - Telefone: (43) 3338-5738 | www.laborsolo.com.br | laborsolo@laborsolo.com.br



## ANEXO III

Análises do lodo gerado em reatores UASB / ETE-Lageado

Amostra (Lodo de esgoto sem material estruturante)



**INSTITUTO AGRONÔMICO**  
 Centro de P&D de Solos e Recursos Ambientais  
 Laboratório de Fertilizantes e Resíduos

Av. Barão de Itapura, 1481 – CEP 13020-902 – Campinas/SP – Brasil  
 Tel: (019) 2137-0646 – adm\_fertilizantes@iac.sp.gov.br – www.iac.sp.gov.br



## BOLETIM DE ANÁLISE

Nº 1810/15

## DADOS DO INTERESSADO:

**Empresa:** Cia de Saneamento Básico do estado de São Paulo-Sabesp  
**Contato:** Ana Lucia Silva  
**Endereço:** R. Adolfo Pardini, 555  
**Município / UF:** Botucatu/SP CEP 18610-250  
**CNPJ / CPF:** 43.776.517/0001-80  
**Telefone:** 14 3882-0404  
**Email:** anasilva@sabesp.com.br

## DADOS GERAIS DA(S) AMOSTRA(S):

**Tipo:** Resíduo  
**Origem:** ETE Lageado, Botucatu/SP  
**Data Recebimento:** 17/11/15  
**Nome Resp. Coleta:** pelo interessado  
**Data e Horário Coleta:** 16/11/15 as 14h30min

## IDENTIFICAÇÃO DA(S) AMOSTRA(S):

**Número Interno:** 3216/15  
**Identificação especificada pelo Interessado:** ETE-Lageado

## RESULTADOS:

Determinação	Método	Unid. <sup>(1)</sup>	3216/15	Data Ensaio
Alumínio	(a)	mg/kg	44190	30/11/15
Boro	(a)	mg/kg	209	30/11/15
Cádmio	(a)	mg/kg	4,0	30/11/15
Cálcio	(a)	g/kg	18,4	30/11/15
Chumbo	(a)	mg/kg	20,2	30/11/15
Cobre	(a)	mg/kg	342	30/11/15
Cromo	(a)	mg/kg	142	30/11/15
Enxofre	(a)	g/kg	34,6	30/11/15
Ferro	(a)	mg/kg	41,0	30/11/15
Fósforo	(a)	g/kg	24,8	30/11/15
Magnésio	(a)	g/kg	2,7	30/11/15
Manganês	(a)	mg/kg	211	30/11/15
Molibdênio	(a)	mg/kg	2,0	30/11/15
Níquel	(a)	mg/kg	21,6	30/11/15
Zinco	(a)	mg/kg	568	30/11/15

FQ-RES-008.02

Rev.01

*O(s) resultado(s) apresentados refere(m)-se somente à(s) amostra(s) encaminhada(s) ao IAC.  
 Reproduções deste documento só tem validade se for na íntegra.  
 Amostragem de responsabilidade do Interessado.*

Página 1 de 1

## ANEXO III

Análises do lodo degerado em reatores UASB / ETE-Lageado

(Metodologia de análise utilizada)



**INSTITUTO AGRÔNOMICO**  
**Centro de P&D de Solos e Recursos Ambientais**  
**Laboratório de Fertilizantes e Resíduos**  
 Av. Barão de Itapura, 1481 – CEP 13020-902 – Campinas/SP – Brasil  
 Tel: (019) 2137-0646 – adm\_fertilizantes@iac.sp.gov.br – www.iac.sp.gov.br

**MÉTODO(S):**

- a. EPA-SW-846-3051, com determinação por ICP-AES, de acordo com EPA-SW-846-6010

**INFORMAÇÕES ADICIONAIS:**

1. Todos os resultados são expressos em base seca.
2. Não quantificado, menor do que o limite de quantificação.

Campinas, 3 de dezembro de 2015.

**Dra. Aline Renée Coscione**Gerência Técnica  
CRQ IV – 04236186

FQ-RES-008.02

Rev.01

*O(s) resultado(s) apresentados refere(m)-se somente à(s) amostra(s) encaminhada(s) ao IAC.  
 Reproduções deste documento só tem validade se for na íntegra.  
 Amostragem de responsabilidade do Interessado.*

Página 1 de 1

## ANEXO IV

Análises do lodo gerado em reatores UASB / ETE-Lageado

Amostra (Lodo de esgoto sem material estruturante)



**INSTITUTO AGRONÔMICO**  
**Centro de P&D de Solos e Recursos Ambientais**  
**Laboratório de Fertilizantes e Resíduos**  
 Av. Barão de Itapura, 1481 – CEP 13020-902 – Campinas/SP – Brasil  
 Tel: (019) 2137-0646 – adm\_fertilizantes@iac.sp.gov.br – www.iac.sp.gov.br

## BOLETIM DE ANÁLISE

Nº 1811/15

## DADOS DO INTERESSADO:

**Empresa:** Cia de Saneamento Básico do estado de São Paulo-Sabesp  
**Contato:** Ana Lucia Silva  
**Endereço:** R. Adolfo Pardini, 555  
**Município / UF:** Botucatu/SP CEP 18610-250  
**CNPJ / CPF:** 43.776.517/0001-80  
**Telefone:** 14 3882-0404  
**Email:** anasilva@sabesp.gov.br

## DADOS GERAIS DA(S) AMOSTRA(S):

**Tipo:** Resíduo  
**Origem:** ETE Lageado, Botucatu/SP  
**Data Recebimento:** 17/11/15  
**Nome Resp. Coleta:** pelo interessado  
**Data e Horário Coleta:** 16/11/15 as 14h30min

## IDENTIFICAÇÃO DA(S) AMOSTRA(S):

**Número Interno:** 3216/15  
**Identificação especificada pelo Interessado:** ETE Lageado

## RESULTADOS:

Determinação	Método	Unid. <sup>(1)</sup>	Amostra	
			Nº	Data Ensaio
pH (em água 1:10)	(b)	-	3216/15	24/11/15
Umidade, a 60 – 65°C	(b)	%m/m	13,6	26/11/15
Sólidos Totais	(b)	%m/m	87,8	26/11/15
Sólidos Voláteis	(b)	%m/m	48,6	27/11/15
Carbono Orgânico	(b)	g/kg	240	27/11/15
Nitrogênio Kjeldahl	(b)	g/kg	32,9	27/11/15
Nitrogênio amoniacal	(b)	mg/kg	8169	24/11/15
Nitrogênio nitrato-nitrito	(b)	mg/kg	244	24/11/15
Bário	(a)	mg/kg	209	30/11/15
Arsênio	(a)	mg/kg	12,2	30/11/15
Selênio	(a)	mg/kg	12,3	30/11/15
Mercúrio	(a)	mg/kg	<1,0 <sup>(2)</sup>	30/11/15
Potássio	(a)	mg/kg	1824	01/12/15
Sódio	(a)	mg/kg	959	01/12/15

FQ-RES-008.03

Rev.01

*O(s) resultado(s) apresentados refere(m)-se somente à(s) amostra(s) encaminhada(s) ao IAC.  
 Reproduções deste documento só tem validade se for na íntegra.  
 Amostragem de responsabilidade do Interessado.*

## ANEXO IV

Análises do lodo degerado em reatores UASB / ETE-Lageado

(Metodologia de análise utilizada)



## INSTITUTO AGRÔNOMICO

Centro de P&D de Solos e Recursos Ambientais  
Laboratório de Fertilizantes e ResíduosAv. Barão de Itapura, 1481 – CEP 13020-902 – Campinas/SP – Brasil  
Tel: (019) 2137-0646 – adm\_fertilizantes@iac.sp.gov.br – www.iac.sp.gov.br

## MÉTODO(S):

- a. Metais: EPA-SW-846-3051, com determinação por ICP-AES, de acordo com EPA-SW-846-6010;
- b. Nitrogênio total: método Kjeldahl; Nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrito: destilação por arraste a vapor; Carbono orgânico: digestão com dicromato e determinação volumétrica, Umidade e Sólidos voláteis: perda de massa a 60 e 500 °C, respectivamente; pH, determinação em extrato aquoso na proporção 1:10 (resíduo:água), segundo métodos descritos em "de Andrade, J.C.; de Abreu, M.F. (editores), **Análise Química de Resíduos Sólidos para Monitoramento e Estudos Agroambientais**, Editora IAC, Campinas, 2006, 178p."

## INFORMAÇÕES ADICIONAIS:

1. Todos os resultados são expressos em base seca.
2. Não quantificado, menor do que o limite de quantificação.

Campinas, 3 de dezembro de 2015.

**Dra. Aline Renée Coscione**Gerência Técnica  
CRQ IV – 04236186IAC  
INSTITUTO AGRÔNOMICOFQ-RES-008.03  
Rev.01

*O(s) resultado(s) apresentados refere(m)-se somente à(s) amostra(s) encaminhada(s) ao IAC.  
Reproduções deste documento só tem validade se for na íntegra.  
Amostragem de responsabilidade do Interessado.*

Página 1 de 1